

D 2060

ეროვნული
ბიბლიოთეკა

На правах рукописи

Зумбуридзе Отари Григорьевич

УДК 621.397.13

ЭФФЕКТИВНОЕ ВЕКТОРНОЕ КВАНТОВАНИЕ
ТВ ИЗОБРАЖЕНИИ

05.02.05 – Теория телекоммуникации, системы и устройства
передачи и распределения информации

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант –
действительный член
международной Академии
информатизации,
доктор технических наук,
профессор Харатишвили Н.Г.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	5
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	12
ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	19
ГЛАВА I. ВЕКТОРНОЕ КВАНТОВАНИЕ КАК МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКА	31
I.1. Задача исследований	31
I.2. Оптимальное кодирование источника при векторном квантовании	33
I.3. Общая теория векторного квантования	37
I.4. Алгоритм векторного квантования и оценка его опти- мальности	41
I.5. Оценка вычислительных затрат векторного квантования изображений и субоптимальное кодирование	45
I.6. Исследование методов сокращения вычислительных зат- рат при векторном квантовании ТВ изображений	50
Выводы к главе I	64
ГЛАВА 2. ОДНОМЕРНОЕ И ЭФФЕКТИВНОЕ КВАНТОВАНИЕ ТВ ИЗОБРАЖЕНИИ	66
2.1. Задача исследований	66
2.2. О точностных критериях при квантовании ТВ изобра- жений	67
2.3. Оценка выигрышей в отношении сигнал-шум квантования при неравномерном квантовании	80
2.4. Исследование робастности квантования ТВ изображений.	94
2.5. Оценка робастности среднеквадратически оптимальных квантователей ТВ изображений	101
2.6. Оптимизация процесса квантования с учетом статисти- ческих свойств ТВ изображений и особенностей их	

ГЛАВА 4.	зрительного восприятия	112
2.7.	Квантование ТВ изображений с учетом весовой функции заметности искажений ошибок квантования ...	122
2.8.	Расчет шкал квантования при ДИКМ ТВ сигналов с использованием зрительных порогов заметности искажений	127
2.9.	Робастное векторное квантование сигналов изображений в сочетании со скалярным квантованием	139
	Выводы к главе 2	147
ГЛАВА 3.	ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ ТВ ИЗОБРАЖЕНИИ	150
3.1.	Задача исследований	150
3.2.	Векторное квантование ТВ изображений при различной геометрии блоков	156
3.3.	Векторное квантование с учетом статистических особенностей ТВ изображений и их зрительного восприятия	173
3.4.1.	Исследование методов усиления корреляционных связей на границе соседних блоков	178
3.4.	Векторное квантование ТВ изображений с переменной точностью квантования	186
3.5.	Векторное квантование ТВ изображений на основе контурно-текстурной модели изображений	199
3.6.	Векторное квантование последовательности ТВ изображений посредством трехмерных блоков	211
3.7.	Векторное квантование изображений в сочетании с пирамидальным построением.....	216
	Выводы к главе 3	229

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ В СОЧЕТАНИИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ И РЕШЕТЧАТЫМ КВАНТО- ВАНИЕМ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕС- КОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..	233
4.1. Задача исследований	233
4.2. Векторное квантование ТВ изображений в сочетании с дискретным косинус преобразованием	236
4.3. Решетчатое векторное квантование ТВ изображений	241
4.4. Каскадное векторное квантование ТВ изображений	246
4.5. Оценка качественных и информационных характеристик при квантовании ТВ изображений	252
4.6. Результаты субъективно-статистических экспертиз век- торного квантования ТВ изображений	271
4.7. Экспериментальное исследование скалярного квантова- ния для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спут- никовым линиям связи	275
4.8. Кодек ТВ сигналов для видеоконференцсвязи со ско- ростью 256 Кбит/с	292
Выводы к главе 4	297
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	301
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	308
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	327
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	339

В В Е Д Е Н И Е

Внедрение цифровых систем передачи информации во многом определяется разработкой эффективных методов цифрового кодирования широкого класса сигналов, в том числе телевизионных. При переходе к цифровым методам передачи, как известно, полоса частот занимаемая цифровым сигналом расширяется по сравнению с исходным сигналом. С целью повышения эффективности и экономичности системы передачи информации полосу частот, занимаемую цифровым сигналом, следует уменьшить (с учетом требуемой точности восстановления). Проблема сокращения числа двоичных единиц (бит), приходящих на отсчет, особенно важна при передаче широкополосных сигналов, в частности телевизионных. Основным этапом процесса преобразования исходных аналоговых ТВ сигналов в цифровую форму является квантование. Одной из основных задач при разработке устройств передачи и хранения ТВ изображений является построение квантующих устройств, обеспечивающих требуемую точность восстановления ТВ изображений при малом числе двоичных единиц приходящих на элемент изображения.

К настоящему времени разработано ряд методов эффективного квантования ТВ изображений [1]. Как показано в работе [89], методы кодирования изображений первого поколения, использующие в основном статистические особенности источника, обеспечивали коэффициент сжатия изображения порядка десяти. Однако, использование как свойств источника так и особенностей зрительной системы позволяют построить методы кодирования, эффективность которых, с точки зрения повышения коэффициента сжатия, значительно можно повысить. Методы кодирования изображения, согласованные со зрительной системой человека, являются методами кодирования второго поколения [89]. К методам первого поколения следует отнести кодирование с пред-

сказанием [51,52], кодирование на основе ортогональных преобразований [53,54] и так называемые гибридные методы кодирования, использующие сочетание методов предсказания и преобразования [59]. В определенном смысле к методам второго поколения можно причислить метод адаптивного группового кодирования [46]. При этом методе возможно лучше согласовать статистические свойства изображений и особенности зрительного восприятия на базе обработки группы элементов изображения, размер которых был согласован с размером функциональной единицы сетчатки-рецептивным полем. Согласно предположению [46] такое рецептивное поле имеет размер 4×4 эл. изображения, при рассматривании ТВ изображений с расстояния равного $6H$ (H - высота экрана). Среди методов, учитывающих свойство источника сигнала и свойство зрения, выгодно отличаются методы векторного квантования сигналов [78-81,87-88], обеспечивающие высокий коэффициент сжатия, при достаточно хорошем качестве восстановленных ТВ изображений. Однако, следует отметить, что до проведенных автором исследований некоторые вопросы квантования требовали дальнейших исследований: оценка потенциальной возможности (в смысле эффективности, оцениваемой выигрышем в отношении сигнал-шум и снижением числа дв.ед. на элемент) процесса квантования ТВ изображений, вопросы влияния совместного учета свойств источника и получателя на эффективность квантования, задача инвариантности качественных показателей процесса квантования при изменении статистических характеристик квантуемых ТВ изображений (задача робастности квантования), вопросы повышения эффективности кодирования ТВ изображений на основе векторного квантования, путем разработки алгоритмов, уменьшающих интенсивность специфических искажений, сопутствующих процессу векторного квантования и улучшение качества восстановленных ТВ изображений на основе использования некоторых осо-

бенностей их зрительного восприятия и статистических характеристик ТВ изображений, разработка алгоритмов, упрощающих вычислительные процедуры реализации процесса векторного квантования ТВ изображений.

Поскольку эффективность всей системы цифровой передачи ТВ сигналов во многом определяется эффективностью процесса квантования, исследование максимально достижимой эффективности квантования ТВ изображений и разработка методов, реализующих эту эффективность, является важной научно-технической проблемой.

Основными научными положениями, сформулированными в данной диссертационной работе и выносимыми на защиту, являются:

1. Векторное квантование ТВ изображений, как метод блочного кодирования источника, может обеспечить скорость кодирования сколь угодно близкую к функции скорость-погрешность $R(D)$. Повышение эффективности процесса создания кодовых книг можно осуществить на основе уменьшения вероятности появления пустых кластеров. В результате использования модифицированного метода "ближайшего соседа" можно достигнуть значительного уменьшения вычислительных затрат при векторном квантовании ТВ изображений. Улучшение качественных показателей векторного квантования (на 5 - 6 дБ и уменьшение вычислительных затрат на создание кодовой книги может быть достигнуто за счет использования вероятностных характеристик кодовых векторов, разделения кодовой книги на несколько подкниг, в соответствии с контурно-текстурной моделью ТВ изображений и некоторых геометрических свойств векторного пространства.

2. Определение параметров статистически оптимизированного квантования ТВ сигналов может быть осуществлено на основе предложенных функциональных преобразований, которые приводят к декорреляции квантуемых ТВ сигналов и обеспечивают выигрыш в отношении

сигнал-шум квантования 2...6 дБ для исходных ТВ сигналов и 12 дБ для их разностных значений. Параметры статистически оптимизированного квантования ТВ сигналов могут быть определены на основе предложенной методики, сводящей сложные итерационные методы расчетов, к относительно простым аналитическим и графоаналитическим расчетам.

3. Оценка робастности квантования (влияние изменений статистических характеристик квантуемых ТВ сигналов на оптимальность процесса квантования) может быть осуществлена по предложенной методике, указывающей на робастность равномерного квантования при неполных априорных данных о статистике квантуемых ТВ сигналов. При заданной статистике наибольшая робастность квантования (характеризуемая нечувствительностью отношения сигнал-шум квантования при многократном увеличении дисперсии квантуемых сигналов) достигается при распределении вероятности значения квантуемых ТВ сигналов, описываемых функцией Гаусса, и параметрах квантования, согласованных с распределением Лапласа. В том случае, когда квантование согласовано по распределению, но не согласовано по дисперсии, например при числе уровней квантования 32, увеличение дисперсии квантуемых сигналов в четыре раза вызывает уменьшение отношения сигнал-шум квантования на 12 дБ.

4. Параметры оптимизированного квантования ТВ сигналов могут быть определены на основе предложенных методов (учитывающих весовые функции и зрительные пороги заметности специфических искажений), которые приводят к упрощению численных и графических процедур расчетов и обеспечивают построение квантователей, параметры которых близки к параметрам квантования, оптимизированного на основе субъективных экспертиз. Сочетание векторного квантования со скалярным квантованием (на основе

раздельного квантования среднего и среднеквадратического значений векторов) не нарушает оптимальность векторного квантования. Использование равномерного квантования для среднего значения векторов (на 32 уровня) и неравномерного квантования (на 16 уровней), для среднеквадратического значения векторов, позволяют обеспечить хорошее качество восстановленных ТВ изображений и робастность процесса квантования.

5. Переход от ортогональной структуры дискретизации к шахматной может привести к снижению точностных показателей процесса векторного квантования в среднем на 2 дБ, в то же время число двоичных единиц, приходящих на элемент ТВ изображения при переходе к шахматной структуре уменьшается вдвое. При формировании кодовой книги, переход от блоков квадратной формы к ромбовидной, учитывающий анизотропию пространственного спектра реальных ТВ изображений их зрительного восприятия, может обеспечить улучшение точностных показателей процесса векторного квантования по сравнению со всеми другими формами блоков. Так, например, по сравнению с прямоугольной формой блоков выигрыш в пиковом отношении сигнал-шум составляет в среднем 0,5 дБ, а по сравнению с блоками, имеющими форму параллелограмма -1,5 дБ.

6. Уменьшение специфических искажений векторного квантования ТВ изображений может быть достигнуто применением (при восстановлении ТВ изображений) блоков, перекрывающие столбцы и, строки которых сформированы путем интерполяции на основе элементов, принадлежащих соседним блокам. При этом, например, пиковое отношение сигнал-шум может быть увеличено в среднем на 1,5 дБ. Уменьшение специфических искажений также может быть достигнуто на основе интерполяционного ВК, приводящего к дальнейшему увеличению пикового отношения сигнал-шум в среднем на 1,2 дБ по сравнению с преды-

дущим методом.

7. Векторное квантование ТВ изображений с переменной точностью квантования, учитывающее как зависимость остроты зрения от угла периферийности, так и анизотропию пространственного спектра реальных ТВ изображений и свойства их зрительного восприятия, может улучшить субъективное качество восстановленных ТВ изображений в среднем на 0,75 балла по пятибальной шкале МККР. Повышение качества восстановления ТВ изображений может быть достигнуто с использованием модифицированного алгоритма классифицированного векторного квантования, основанного на контурно-текстурной модели ТВ изображений. Повышение точности классификации при создании кодовых книг классифицированного векторного квантования может быть достигнуто за счет алгоритма проверки принадлежности каждого кодового вектора к соответствующему классу.

8. Переход от двумерного к трехмерному векторному квантованию последовательностей ТВ изображений при различных структурах их пространственной дискретизации показал, что при использовании двумерного векторного квантования наряду со специфическими искажениями, характерными для неподвижных ТВ изображений дополнительно возникают искажения типа "МУАР". Субъективное восприятие последних может быть существенно уменьшено путем использования трехмерного ВК и при скорости кодирования 0,07 бит/эл. может быть обеспечено пиковое отношение сигнал-шум равное 27 дБ. Сочетание векторного квантования с Вейвлет преобразованием позволяет повысить эффективность Вейвлет пирамиды при векторном квантовании первого уровня пирамиды. Эффективность кодирования может быть повышена в 1,5 раза, если из процесса восстановления исключить область первого уровня пирамиды с диагональной ориентацией контуров.

9. Адаптивный классифицированный векторный квантователь в со-

четании с дискретным косинус преобразованием и решетчатым квантованием может сократить время создания кодовой книги на 30-35%, по сравнению с тем случаем, когда начальная кодовая книга выбирается случайным образом. Эффективность каскадного векторного квантования может быть повышена на 5 дБ, если во втором каскаде двухкаскадного ВК использовать блок, размером в четыре раза больше, чем в первом каскаде. При векторном квантовании ТВ изображений наибольшему изменению, по сравнению с исходным изображением, подвергается условная энтропия изображения, в тоже время, наибольшее сжатие может быть обеспечено при использовании условной энтропии. Для измерения "близости" исходных и квантованных изображений может быть использован информационный коэффициент влияния исходного изображения на квантованное изображение.

Результаты проведенных теоретических исследований, изложенные в данной диссертационной работе, доведены до инженерных решений, таблиц и графиков, подтверждены экспериментально моделированием на ЭВМ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Для эффективного цифрового кодирования ТВ сигналов, наряду с другими методами, большое внимание уделяется методам векторного квантования сигналов, обладающим высокой эффективностью.

ОСНОВНОЙ ЦЕЛЬЮ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ является исследование и разработка методов эффективного квантования ТВ изображений на основе одномерного (скалярного) и многомерного (векторного) квантований с учетом, как статистических характеристик изображений, так и психофизиологических свойств зрения (ограничений зрительного восприятия) и разработка методик определения параметров оптимизированного квантования для систем цифровой передачи ТВ изображений. В задачу диссертации также входит исследование робастности (в смысле неизменности качественных показателей квантованных ТВ изображений) скалярного и векторного квантований; разработка методов уменьшения специфических искажений, сопутствующих процессу квантования ТВ изображений, основанных на оптимальном использовании как статистических характеристик ТВ изображений, так и свойств и зрительного восприятия; разработка алгоритмов, упрощающих вычислительные процедуры при реализации процесса квантования ТВ изображений.

АКТУАЛЬНОСТЬ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ обусловлена широким внедрением эффективных цифровых методов кодирования и обработки ТВ изображений в различных системах передачи информации (наземных и спутниковых).

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Основными результатами диссертационной работы, обладающими научной новизной, являются :

1. Исследование векторного квантования, как метода эффективного кодирования источника (Глава 1);

- изложение векторного квантования, как метода эффективного кодирования, с точки зрения теории скорость-погрешность. Оформулирование условий оптимальности векторного квантования (изложено в разделах 1.2 и 1.3, опубликовано в [1-2]);

- описание алгоритма векторного квантования и оценка его оптимальности (изложено в разделе 1.4, опубликовано в [3]);

- результаты исследования методов сокращения вычислительных затрат при векторном квантовании ТВ изображений. (изложено в 1.6, опубликовано в [4-5]);

2. Исследование робастности и сочетания одномерного (скалярного) и многомерного (векторного) квантований ТВ изображений:

- результаты исследований эффективности перехода от равномерного квантования к неравномерному на основе предложенных законов компандирования, а также результаты исследований эффективности перехода от скалярного квантования к векторному для ТВ изображений (изложено в 2.2, опубликовано в [6-11, 27]);

- методика аналитических и графических расчетов параметров квантования ТВ изображений на основе критериев минимума средних значений степенных функций потерь и априори заданных статистических характеристик квантуемых сигналов (изложено в 2.3, опубликовано в [12-15, 31]);

- результаты оценки робастности квантования ТВ изображений на основе критерия минимакса, когда распределение вероятностей значений сигналов точно не известно (изложено в разделе 2.4, опубликовано в [16-17]);

- результаты оценки робастности среднеквадратически оптимального квантования ТВ изображений, когда плотности вероятностей значений сигналов описываются функциями распределения Гаусса и Лапла-

са (изложено в 2.5, опубликовано [18,26]);

ДИКМ - результаты оценки влияния изменения статистических характеристик (дисперсии) ТВ изображений на оптимальность процесса их квантования (изложено в 2.5, опубликовано в [19]);

ДИКМ - методика расчета параметров оптимизированного квантования ТВ изображений, учитывающая зрительные пороги заметности специфических искажений квантования и статистические свойства ТВ изображений (изложено в 2.6, и 2.7 опубликовано в [20-23,28]);

- методика расчета параметров квантования при ДИКМ ТВ изображений с использованием зрительных порогов заметности искажений (изложено в 2.8, опубликовано в [23-24, 29-30]);

ДИКМ - результаты исследований робастности векторного квантования в сочетании со скалярным квантованием ТВ изображений (изложено в 2.9, опубликовано в [11, 19]);

ДИКМ 3. Исследование методов повышения эффективности процесса векторного квантования ТВ изображений:

3.2. - результаты исследования векторного квантования ТВ изображений при различной геометрии блоков и оценка влияния на точностные показатели процесса векторного квантования, при переходе от ортогональной структуры дискретизации к шахматной (изложено в разделе 3.2, опубликовано в [24]);

3.3. - результаты исследования векторного квантования ТВ изображений при форме блоков отличной от квадратной с учетом анизотропии и пространственного спектра реальных ТВ изображений, при различных критериях, используемых для создания кодовой книги (изложено в разделе 3.3, опубликовано в [24-25]);

- результаты исследования методов усиления корреляционной связи на границе соседних блоков путем перекрытия, при различных

алгоритмах восстановления блоков (изложено в разделе 3.3.1, опубликовано в [27]);

- результаты исследования векторного квантования ТВ изображений с переменной точностью квантования, при котором учитываются как зависимость остроты зрения от угла периферийности, так и анизотропия пространственного спектра реальных ТВ изображений и свойства их зрительного восприятия (изложено в 3.4, опубликовано в [1,5 - 21]);

- результаты исследования методов повышения эффективности классифицированного векторного квантования ТВ изображений на основе учета психофизиологических особенностей их зрительного восприятия (изложено в 3.5, опубликовано в [1,27,32]);

- результаты исследования эффективности перехода от двухмерного к трехмерному квантованию ТВ последовательностей при различных структурах их пространственной дискретизации с учетом как внутри кадровой, так и межкадровой корреляции (изложено в разделе 3.6, опубликовано в [32, 33]); - результаты исследования векторного квантования изображений в сочетании с пирамидой Вейвлет (изложено в разделе 3.7, опубликовано в [34]).

4. Исследования векторного квантования в сочетании с ортогональным преобразованием и решетчатым квантованием. Экспериментальное исследование и практическое применение результатов диссертационной работы.

- результаты исследования адаптивного классифицированного векторного квантования в сочетании с дискретным косинус преобразованием (изложено в 4.2, опубликовано в [1,32,182]);

- результаты исследования решетчатого векторного квантования ТВ изображений, с целью повышения быстродействия алгоритмов кван-

тования (изложено в 4.3, опубликовано в [4,25]);

- результаты исследования двухкаскадного векторного квантования ТВ изображений, при различных объемах кодовых книг и размерностей кодовых векторов, (изложено в 4.4, опубликовано в [32,35])

- результаты исследования качественных и информационных характеристик квантования, позволяющие оценить потенциальную эффективность скалярного и векторного квантований ТВ изображений (изложено в 4.5, опубликовано в [27,36,150,181,183]);

- результаты субъективно статистических экспертиз ТВ изображений при реализации различных методов векторного квантования (изложено в 4.6, опубликовано в [36]);

- результаты экспериментальных исследований скалярного квантования для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи (изложено в 4.7, опубликовано в [37,44,179,180]);

- экспериментальная система видеоконференцсвязи с кодеком, реализующий предложенный метод векторного квантования ТВ изображений со скоростью 256 кбит/с (изложено в разделе 4.8, опубликовано в [24,26,32]).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В диссертационной работе широко используются методы теории информации, теории случайных процессов, теории вероятностей, а также методы моделирования на ЭВМ и экспериментальные исследования.

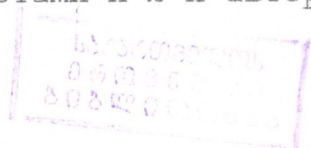
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ. Диссертационная работа содержит все необходимые данные, методику и практические рекомендации для реализации методов эффективного квантования ТВ изображений не вещательного стандарта.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. На основе результатов проведенных исследований разработаны кодеки, для систем цифровой пере-

дачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи со скоростью 24 бит/сек и кодек ТВ сигналов для видеоконференцсвязи со скоростью 256 кбит/с, соответствующих рекомендациям H.201 и H.202 МККТТ.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. Основные результаты по исследованию оценки эффективности векторного квантования ТВ изображений, с точки зрения сокращения вычислительных затрат на векторное квантование, разработке методик расчетов шкал квантования при различных априори заданных статистических характеристик и степенных функций потерь, оценка робастности скалярного и векторного квантований, результаты оценки влияния изменения статистических характеристик ТВ изображений на оптимальность процесса квантования, методика расчета параметров оптимизированного квантования, учитывающие зрительные пороги заметности специфических искажений квантования, результаты исследования векторного квантования ТВ изображений при различной геометрии блоков, с учетом анизотропии пространственного спектра ТВ изображений, разработка методов векторного решетчатого квантования в сочетании с косинус преобразованием, разработка и экспериментальное исследование двухкаскадного векторного квантования с различным объемом и размерностью кодовых векторов, результаты исследования качественных и информационных характеристик квантования ТВ изображений и результаты субъективно-статистических экспертиз получены лично автором.

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты исследований, проведенных автором по вопросам эффективного цифрового кодирования ТВ изображений на базе эффективного квантования, опубликованы в монографии 1 работа, в научных и научно-технических журналах и сборниках 19 работ, материалах международных, всесоюзных и республиканских симпозиумах и конференций, представленных 24 работами и 2-х авторских



свидательствах.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержащих 259 страниц машинописного текста, 67 рисунков, 19 таблиц, списка литературы, включающий 184 наименований и II приложений.

ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросы эффективного цифрового кодирования ТВ сигналов исследовались в ряде работ, выполненных во многих странах мира. Так, общие вопросы цифрового кодирования ТВ сигналов, в том числе и вопросы их оптимального одномерного (скалярного) квантования, рассмотрены в известных работах Кривошеева М.И. [45], Цуккермана И.И. [46,47], Лебедева Д.С. [47], Красильникова Н.Н. [48-49], Ярославского Л.П. [50], Харатишвили Н.Г. [51,52], Pratt S.W. [53,54], Limb J.O. [55,56], O'Neal [57,58], Jayant N.S. [59], Птачек М. [60].

Вопросам оптимизации процесса квантования ТВ сигналов с учетом статистики последних, посвящены работы Величкина А.И. [61,62], Трофимова Б.Е. [63], Виленчика Л.С. [64], J.Max [65], Lloyd S.P. [66], Panter P.F., Dite D.W. [67], Smith B. [68]. Различные аспекты учета свойств получателя (системы зрительного восприятия) при оптимизации процесса квантования ТВ сигналов рассмотрены в работах Харатишвили Н.Г. [51,52], Цуккермана И.И. [46], Musmann H.G. [69], Kretz F. [70], Netravali A.N. [71], Sharma A. [72,73], Limb J.O. [56], Pirch P. [74], Schafer R. [75,76], Candy J.C [77], и др. В последние годы большой интерес уделяется исследованию многомерного (векторного) квантования сигналов. Среди них следует отметить работы Linde Y., Buzo A, Gray R. [78], Gersho A. [79], Ramamurthi B. [80], Nasrabadi N. [81], Makhoul J. [82], H.F.Sun, M.Goldberg, [83], J.H.Conay, N.J.A.Sloane, J.A.Bucklew [85], W.H.Equitiz [86], I.Murakami [87] R.Gray [88] и др.

Однако, следует отметить, что значительный комплекс задач остается полностью или частично нерешенным. Главной особенностью исследований проведенных работ, выполненных диссертантом, являлось

рассмотрение задач эффективного одномерного (скалярного) квантования ТВ сигналов при учете только статистических характеристик квантуемых сигналов; вопросы учета свойств получателя (система зрительного восприятия) начали рассматриваться при создании методов кодирования изображения второго поколения [89], в которых способ кодирования должен быть согласован со зрительной системой человека. Недостаточно исследованы многие аспекты робастного оптимизированного квантования ТВ сигналов. Так, вопросы неравномерного квантования ТВ сигналов были рассмотрены в работах [61,65-67], анализ которых показывает, что при оптимизации процесса квантования ТВ сигналов, на основе статистики квантуемых сигналов, не учитывается влияние изменения числовых характеристик последних на результаты оптимизации квантования. В большинстве работ оценки результатов квантования производится на основе среднеквадратического критерия [40,65-68], тогда как представляют существенный интерес и другие критерии оценки, например, информационный [89], критерии минимума модуля средней ошибки [90] и критерии минимакса. В связи с этим представляет существенный интерес оценка потенциального выигрыша в отношении сигнал-шум квантования при переходе от равномерного квантования к неравномерному; нахождение оптимальных законов компрессии, позволяющих упростить нахождение уровней и порогов квантования, выделения класса ТВ сигналов, для которых нелинейное квантование наиболее эффективно.

Проблема робастного квантования была исследована в ряде работ [90-93]. Так, например, в работе [91] задача квантования, на основе критерия минимакса, рассматривалась для класса распределений, состоящих из унимодальных распределений с ограниченными обобщенными моментами и было показано, что робастным в этом случае является неравномерное квантование. В работах [94] исследованы вопросы

асимптотически робастного квантования при бесконечно большом числе уровней квантования. В качестве модели распределения использовалось унимодальное распределение с ограниченными обобщенными моментами и найден вид минимаксного компрессора. В работе [94], задача нахождения минимаксного компрессора решалась для класса "эпсилон-загрязнений" модели распределения. Однако, исследования робастного квантования применительно к ТВ изображениям с учетом особенностей их статистических характеристик не проводилось. В связи с этим возникла необходимость оценки робастности квантования ТВ изображений на основе различных критериев оптимальности; определение потенциальной возможности робастного квантования ТВ изображений при заданной их плотности вероятностей.

В ряде работ предлагалось использовать свойства зрительной системы с целью уменьшения необходимого числа уровней квантования и улучшения качества восстановленных ТВ изображений [45,56,70-77]. Так, поскольку зрительное ощущение пропорционально логарифму интенсивности стимула [95], для согласования квантования с этим свойством зрительного восприятия предполагалось, при квантовании ТВ сигналов, использовать квазилогарифмическую шкалу. Как показано в [53], такое квантование позволяет снизить необходимое число уровней квантования в два раза по сравнению с равномерным, с целью учета особенности зрительного восприятия искажений, в работе [56] предложено оценить эффективность квантования на основе, так называемой, модифицированной меры искажений, с использованием функций, учитывающих как статистику ТВ сигналов, так и особенности зрительного восприятия ТВ изображений. В работах [72,74-76] для построения квантователей ТВ сигналов использовались пороговые функции заметности, определяющие чувствительность зрительной системы к искажениям квантования. В работе [56] при оценке эффектив-

ности квантования, плотность вероятностей ТВ изображений замене-
на, так называемой вероятностной функцией заметности, учитывающей
эффект зрительного маскирования искажений квантования. В [77] были
исследованы пороги заметности специфических искажений квантования
ТВ изображений при ДИКМ путем моделирования этих искажений на
ЭВМ. В работе [70] были измерены пороги заметности различных типов
искажений квантования для ДИКМ. В работе [77] на основе экспери-
ментально полученных порогов заметности специфических искажений
квантования предложены графические методы расчета шкал квантования
для ДИКМ ТВ изображений. В [73] предложен алгоритм расчета шкал
квантования на ЭВМ методом динамического программирования. Модификация
этого алгоритма, проведенная с целью уменьшения вычислительных
затрат на ЭВМ, предложена в работе [76]. Однако, следует
отметить, что некоторые алгоритмы расчета шкал скалярного кванто-
вания с учетом особенностей зрительного восприятия специфических
искажений квантования, а также потенциальные возможности неравно-
мерного квантования (с точки зрения робастности), требуют дальней-
ших исследований. В частности, возникла необходимость классифи-
кации специфических искажений, сопутствующих процессу квантования
(как скалярного, так и векторного) ТВ сигналов, оценки выигрыша в
отношении сигнал-шум квантования в зависимости от пик-фактора ТВ
изображений при различных видах степенных функций потерь; оценки
выигрыша при переходе от скалярного квантования к векторному для
реальных ТВ изображений; оценки робастности при сочетании скаляр-
ного и векторного квантования ТВ изображений; проверки условия
оптимальности при сочетании скалярного и векторного квантований;
определения параметров квантования ТВ изображений с учетом весовой
функции заметности искажений; определения параметров квантования
ТВ изображений с учетом пороговых свойств зрительного восприятия

специфических искажений квантования.

Среди эффективных методов сжатия информации в последние годы большое внимание уделяется многомерному (или векторному) квантованию сигналов. Основная идея векторного квантования (ВК) исходит из работ Шеннона [97], который предложил идею блочного кодирования источника. Хотя метод создания векторного квантования до недавнего времени не был известен [78]. Идея такого кодирования очень проста. Каждому входному вектору, который представляет собой множество неперекрывающихся отсчетов источника, приписывается вектор из кодовой книги, который является "ближайшим" к входному вектору. Затем этот вектор представляется двоичным числом, кодовым вектором, и передается по каналу. В приемной части имеется такая же кодовая книга из которой выбирается соответствующий вектор. Выбор "ближайшего" вектора осуществляется на основе заданного критерия верности или меры погрешности. Скорость кодирования или число бит на вектор определяется как $\log_2 N$, где N число кодовых векторов в кодовой книге.

Несмотря на простоту идеи векторного квантования, при его реализации возникают большие сложности, связанные с вычислениями ошибки между входными и кодовыми векторами. Поскольку, скорость кодирования и объем кодовой книги находится в логарифмической зависимости, сложность кодирования (связанная с вычислительными затратами) увеличивается экспоненциально. Теоретически векторное квантование достигает предела оптимального сжатия (определяемая функцией скорость-погрешность), когда размерность вектора увеличивается. Более того, для любого метода кодирования, основанного на использовании вектора такой же размерности, рабочие характеристики будут не лучше, чем при векторном квантовании. Таким образом, векторное квантование является оптимальным методом кодирования

[79,88]. Основной недостаток ВК связан со сложностью вычислений, при построении кодовой книги и при кодировании. Исходя из этого, эффективность векторного квантования ТВ изображений должна возрастать при малых скоростях кодирования. С этой целью, представляет интерес выяснить в какой степени, при векторном квантовании ТВ изображений возможно использование корреляции изображения и на этой основе улучшить качества восстановленных изображений. Практически процесс ВК осуществляется путем сегментации (деления) исходных ТВ изображений на смежные, неперекрывающиеся блоки элементов. Искажением квантования является сумма разностей между исходным и квантованными векторами. При ВК в канал связи передается индекс (номер) кодового вектора. Объем кодовых векторов в кодовой книге и размерность вектора (количество элементов блока), определяют число двоичных единиц (бит), необходимых для передачи индексов кодовых векторов. Таким образом, в отличие от скалярного квантования, при ВК блок отсчетов квантуется как одно целое. Учитывая психофизиологические особенности зрительной системы человека, можно сказать, что векторное квантование лучше согласованно с особенностями восприятия ТВ изображений зрительной системы. Так, по предположению [46,89], зрительная система кодирует изображения уже на уровне сетчатки не поэлементно, а группами. По оценкам размер групп, в центральной части сетчатки, составляют несколько угловых минут. Эта величина в несколько раз превышает размеры элемента, определяемого одним фоторецептором. При рассматривании ТВ изображения с расстояния 6Н, размеры группы составляют 4x4 элемента [46]. Эти данные нами были использованы при разработке различных алгоритмов ВК ТВ изображений.

[81] Исследование векторного квантования были начаты относительно недавно на основе работы Гершо [98], который исследовал теорети-

ческие возможности асимптотически оптимального квантования сигналов, на основе работ Задора [99] и Ллойда [400]. В работах [98, 99] была исследована асимптотическая теория векторного квантования. Практический алгоритм ВК был впервые предложен в работе Линде, Вузо и Грей [78], которые использовали кластерный алгоритм, похожий на алгоритм скалярного квантования Ллойда [100] для скалярного квантования сигналов. Предложенный алгоритм был назван алгоритмом ЛБГ. В последующие годы на основе алгоритма ЛБГ были созданы другие алгоритмы ВК, сначала для звуковых сигналов [101], а затем и для ТВ изображений [87].

При ВК ТВ изображений возникают специфические искажения типа "блочная структура", "лестничный эффект" и "вымывание границ" [88]. Кроме этого возникает задача робастности кодовой книги, которая была создана для одного ТВ изображения и используется для кодирования другого изображения. Было предложено несколько методов для уменьшения этих искажений [80, 87, 88, 102-104]. Так, например, в работах [103, 104] была предложена схема дифференциального ВК, при котором из каждого вектора вычиталось его среднее значение, а затем осуществлялось векторное квантование. Среднее значение вектора квантовалось скалярно и передавалось отдельно. В работе [87] была предложена другая схема ВК при котором отдельно квантовалось, как среднее значение, так и среднеквадратическое значение вектора. В работе [80] было предложено раздельное квантование различных групп векторов с помощью отдельных кодовых книг. В работе [105] было предложено адаптивное ВК, с обновлением кодовой книги, однако такое квантование связано с большими вычислениями и скорость кодирования также увеличивается, что снижает эффективность ВК. В работе [81] предложено векторное квантование в преобразовании области. При этом методе возможно осуществить снижение скорости кодирования



за счет отбрасывания некоторой части коэффициентов преобразования. С целью снижения сложности вычислений на осуществление ВК были созданы алгоритмы каскадного ВК [88]. В этом случае векторное квантование осуществляется в нескольких каскадах, что позволяет снизить вычислительные затраты. В работах [102,106] были предложены отдельные методы векторного квантования, на основе разделения спектра исходного изображения на несколько поддиапазонов. Разделение спектра осуществляется с использованием квадратурно-зеркальных фильтров. При этом для кодирования высокочастотной части спектра используется меньшее число бит, чем для низкочастотной части спектра ТВ изображения.

В работах [84,107,108] исследовались решетчатые квантователи сигналов. Так, например, в работе [84] исследованы свойства решеток, которые могут быть использованы для векторного квантования сигналов и основаны на геометрическую теорию чисел [109]. Обширный обзор по теории решеток, упаковки шаров и генерирования решеток рассмотрены в монографии [110]. В работе [111] предложена процедура предварительной сегментации исходных ТВ изображений на однородные участки, текстуру и области контуров с последующим кодированием на основе интерполяционного замещения однородных участков и ВК с предсказанием подобласти текстур и контуров.

Вопросы уменьшения специфических искажений, сопутствующих процессу ВК ТВ изображений рассмотрены в работах [111,112]. В [112] предлагается так называемый метод перегруппировки, который заключается в повороте вокруг своей оси смежных блоков, с целью усиления корреляции между граничными элементами этих блоков. Однако, при практическом применении этого метода, субъективное улучшение качества ТВ изображений наблюдается лишь на фрагментах с плавными изменениями яркости и, в то же время, происходит сильное "размыва-

ние" контуров [27]. В [113], для уменьшения специфических искажений ВК предлагается использовать низкочастотную фильтрацию, однако этот метод сопровождается сильными искажениями контурных областей и понижением четкости ТВ изображений.

В [114] использован метод рекурсивного блочного кодирования для уменьшения специфических искажений ВК, однако, использование данного метода связано с существенным увеличением времени обработки ТВ изображений.

При ВК последовательности ТВ изображений возникают специфические искажения, связанные с движением и особо раздражающие глаз. Для уменьшения искажений в этих случаях можно использовать пространственно-временную структуру последовательности ТВ изображений путем формирования векторов с трехмерным блоком [83]. С точки зрения повышения эффективности ВК ТВ изображений важное значение имеет, также, повышение как быстродействия алгоритмов построения кодовой книги, так и самого процесса ВК. Повышение быстродействия ВК может быть достигнуто, как использованием таких мер искажений, как критерий минимакса и средней абсолютной ошибки [110,115], так и разделением общей кодовой книги на несколько групп по их специальным признакам и использованием решетчатых квантователей [108-110].

На основе проведенного обзора и анализа существующих источников выяснилось, что в проведенных исследованиях отсутствуют данные по влиянию на точностные показатели ВК при переходе от ортогональной структуры дискретизации отсчетов в кадре ТВ изображения к другим структурам, при учете анизотропии пространственного спектра реальных ТВ изображений. Не исследовано влияние на точностные показатели процесса ВК статистических характеристик реальных ТВ изображений, учитывающих изменение как формы блоков, на которые под-

разделяются исходные ТВ изображения при создании кодовой книги, так и структуры пространственной дискретизации. Не рассмотрены точностные показатели процесса ВК при сегментации исходных ТВ изображений на блоки, форма которых отображает одновременный учет анизотропии пространственного спектра реальных ТВ изображений и их зрительного восприятия. Не исследованы вопросы уменьшения зрительного восприятия специфических искажений, сопутствующих процессу ВК на основе учета межблочной корреляции. Не рассмотрены вопросы векторного квантования с переменной точностью квантования, учитывающие характерные особенности статистических характеристик реальных ТВ изображений и свойства их зрительного восприятия. Не исследованы методы повышения эффективности процесса построения кодовых книг при классифицированном ВК. Не исследованы различные аспекты уменьшения вычислительных затрат, как при создании кодовой книги, так и при квантовании. Недостаточно исследованы вопросы двухкаскадного ВК при различных объемах и размерностях кодовых книг, в первом и во втором каскадах. Не исследованы вопросы сочетания решетчатого ВК с дискретным косинус преобразованием ТВ изображений, с точки зрения снижения вычислительных затрат на ВК.

Не оценена возможность сочетания векторного квантования с пирамидой Веивлет. Не проведены экспериментальные оценки ряда качественных и информационных характеристик процесса квантования ТВ изображений.

На основе вышеизложенного, основные задачи исследования диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

- исследование векторного квантования ТВ изображений, как метода оптимального кодирования источника и оценка оптимальности алгоритма векторного квантования и исследование субоптимального кодирования;

- исследование методов сокращения вычислительных затрат векторного квантования ТВ изображений, на основе вероятностных характеристик исходных векторов;
- исследование статистически оптимизированного квантования ТВ изображений на основе функциональных преобразований с последующим равномерным квантованием, обеспечивающий выигрыш в отношении сигнал-шум квантования по сравнению с равномерным квантованием;
- разработка методики определения параметров статистически оптимизированного квантования ТВ изображений, сводящий сложные итерационные методы расчета к относительно простым аналитическим и графоаналитическим расчетам;
- разработка методики оценки робастности скалярного квантования (влияния изменения статистических характеристик ТВ изображений на оптимальность процесса квантования) при различных априорных данных о статистике квантуемых ТВ сигналов;
- исследование робастности при сочетании скалярного и векторного квантований и оценка сохранения оптимальности при таком сочетании;
- разработка методов определения параметров оптимизированного квантования ТВ изображений, учитывающего весовые функции и зрительные пороги заметности специфических искажений, приводящих к упрощению численных и графических методов расчета;
- исследование эффективности изменения формы блоков при сегментации ТВ изображений в процессе ВК и одновременный учет статистических особенностей ТВ изображений и свойств их зрительного восприятия;
- исследование методов уменьшения специфических искажений, сопутствующих процессу ВК ТВ изображений, на основе создания различных алгоритмов ВК;

- повышение эффективности ВК на основе контурно-текстурной модели ТВ изображений;
- оценка эффективности перехода от двумерного ВК ТВ последовательностей к трехмерному;
- исследование сочетания векторного квантования ТВ изображений с пирамидальным построением Веивлет;
- исследование сочетания векторного квантования с дискретным косинус преобразованием и с решетчатым квантованием ТВ изображений;
- оценка эффективности ВК ТВ изображений, при различных объемах и размерностях кодовых книг в первом и во втором каскадах двухкаскадного ВК;
- исследование ряда качественных и информационных характеристик процесса квантования ТВ изображений и оценка эффективности перехода от скалярного квантования к векторному;
- экспериментальное подтверждение полученных теоретических результатов.

На основании полученных результатов должны быть разработаны рекомендации для практической реализации эффективного квантования ТВ изображений для этих систем цифровой передачи по спутниковым линиям связи и для систем видеоконференцсвязи.

Г Л А В А 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ КАК МЕТОДА КАК МЕТОДА ЭФФЕКТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКА

1.1. Задача исследования

Векторное квантование относится к групповым методам кодирования сигналов. В последние годы исследованию методов векторного квантования уделяется большое внимание исследователей. [78-81, 87-88, 117-118]. Векторное квантование можно использовать как эффективный метод кодирования звука и изображения. Основной недостаток векторного квантования связан с экспоненциальным ростом сложности вычислений, когда используются блоки большого размера. Как показали исследования Шеннона [97], при кодировании блоков большого размера, оптимальность методов кодирования увеличивается. Однако, известно, что стоимость цифровой памяти и средств передачи, пропорциональны количеству двоичных единиц, подлежащих передаче или хранению. Следовательно, существует необходимость минимизировать число бит, необходимое для передачи сигналов, при сохранении приемлемого качества восстановления. Теоретической основой сжатия данных и векторного квантования являются работы Шеннона [97] и Бергера [119], известные под названием теории передачи с учетом погрешности. Оценка эффективности алгоритмов векторного квантования должна производиться на основе этой теории. С практической точки зрения, при построении векторных квантователей, важно исследовать методы снижения вычислительных затрат и требуемой емкости памяти за счет некоторого ухудшения рабочих характеристик. При построении кодовой книги для векторного квантования ТВ изображений, большое значение имеет выбор начальной кодовой книги и меры искажений, ко-

торые во многом определяют эффективность векторного квантования. При построении алгоритмов уменьшения вычислительных затрат на создание кодовых книг и векторное квантование, большое значение имеет использование некоторых вероятностных характеристик исходных векторов и психовизуальных свойств зрения. Для практической оценки эффективности различных алгоритмов сокращения вычислительных затрат векторного квантования, целесообразно осуществить моделирование этих алгоритмов с помощью специализированных устройств, позволяющих оценить качество восстановленных ТВ изображений.

Изложению выше перечисленных вопросов векторного квантования ТВ изображений, посвящена настоящая глава диссертационной работы.

1.2. Оптимальное кодирование источника при векторном квантовании

Допустим, что Z стационарный, эргодический источник, который вырабатывает последовательность $\{X_i\}_{i=-\infty}^{i=+\infty}$. Каждый символ источника принимает значения из пространства X . X_i - может быть скалярной или векторной величиной. Пусть n обозначает размерность X_i . Если X_i статистически независимый, то такой источник будем считать источником без памяти. Выход векторного источника без памяти состоит из статистически независимых векторов. Если выходы скалярного источника без памяти сгруппированы в n -мерные векторы, их можно рассматривать как выходы n -мерного векторного источника без памяти. Следует отметить, что если даже скалярный источник Z нестационарный, то векторный - образованный сгруппированием скалярных величин может быть стационарным. Скалярный источник без памяти является предельным случаем векторного источника без памяти, когда $n=1$.

Пространство пользователя обозначим через Y , которое не обязательно идентично пространству X . Алфавит пользователя обозначим через $\{Y_i\}$, что является выходом кодера источника. Через $d_n(X, Y)$ обозначим неотрицательную меру погрешности, определенную для каждой пары (X, Y) . Блок последовательных символов источника, длиной k , из последовательности источника, обозначим через X^k , тогда Y^k будет обозначать символы пользователя. Среднее значение погрешности между k -выходными символами источника $\{X_i\}$ и k воспроизводящими символами $\{Y_i\}$, определяется соотношением

$$d^k(X^k, Y^k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k d_n(X_i^k, Y_i^k) \quad (1.2.1)$$

Если $P^k(X^k)$ плотность вероятностей X^k , код длиной k будет определяться плотностью вероятностей переходов $\{q(X^k|Y^k)\}$. Выходом кван-

тователя для X^k является Y^k . Погрешность в этом случае будет $D^k = M[d^k(X^k, Y^k)]$. Для k -мерной функции скорость-погрешность можно записать [119].

$$R^k(D^k) = \frac{1}{n} \inf_Q I(X^k, Y^k) \quad (1.2.2)$$

где Q - множество квантователей для которых выполняется условие $M[d^k(X^k, Y^k)] \leq D^k$, $I(\cdot, \cdot)$ - взаимная информация. Тогда для скорости как функции погрешности, при заданном D имеем

$$R(D) = \inf_k \frac{1}{k} R^k(D) \quad (1.2.3)$$

Теорема кодирования источника [97, 119], определяет теоретически достижимую границу при сжатии данных. При построении кодеров источника сигналов изображений особенно важна разработка эффективных алгоритмов квантования (кодирования), позволяющие достигнуть скорости близкие к $R^k(D^k)$. При этом следует обратить внимание на выбор мер погрешности, согласующихся с требованиями получателя, а также нахождение приемлемых статистических моделей источников изображений. Скорость как функции погрешности $R(D)$ определяется нижней гранью значения средней взаимной информации, при соответствующих ограничениях налагаемых на меру погрешности. Следует отметить, что для векторного источника без памяти, скорость как функция погрешности для любого k равна [119]

$$R(D) = \frac{1}{k} R^k(D) \quad (1.2.4)$$

это означает, что для достижения $R(D)$ можно взять k равной единице. Однако, такое кодирование практически не осуществимо, при $R(D)$ бит на символ источника [119].

Возможный путь кодирования источника со скоростью сколь угодно близкой к $R(D)$ - блочное кодирование источника. Такое кодирование впервые было предложено Бергером в работе [119]. Блочный код,

это детерминированный код, для которого плотность вероятности перехода не равна нулю. Для этих точек воспроизведения вероятности переходов являются бинарными. Обозначим множество точек воспроизведения как $C_N^k = \{Y_j^k\}_{j=1}^N$. Правило оптимального кодирования, для любого X^k , позволяет выбрать кодовый вектор Y^k такой, для которого выполняется условие

$$d^k(X^k, Y_i^k) \leq d^k(X^k, Y_j^k) \quad \text{для всех } j \neq i$$

Таким образом, блочное кодирование фактически является векторным квантователем. Скорость для такого кода определяется как $\log_2 N$, и такая скорость достигается присвоением равномерного кодового слова N кодовым векторам из множества кодовой книги C . Согласно теореме кодирования источника [97, 119], при достаточно большом k , существует векторный квантователь с погрешностью равной D^k сколь угодно близкой к D и скоростью произвольно близкой к функции скорость-погрешность $R(D)$.

Хотя, существует недетерминированный код, который позволяет достичь $R(D)$, с практической точки зрения следует использовать детерминированный блочный код и осуществить квантование выхода источника. Для источника с памятью, $R^k(D^k)$ неубывающая функция k , для любого заданного D^k , чем больше значение k тем ближе можно подойти к $R(D)$. Однако, при большом k кодирование практически затрудняется. Во многих случаях при блочном кодировании, можно ограничиться определенной структурой, что приводит к независимому квантованию X_i , т.е. к скалярному квантованию, при $n = 1$. Векторное квантование сигналов стало возможным благодаря построению практического алгоритма векторного квантования [78].

Для достижения $R(D)$, блочным кодом, размер блока k и, в свою очередь, длина кода N должны быть очень большими. Скорость

передачи R_B - достигнутая наилучшим векторным квантователем, для фиксированного k и заданного D^k , будет больше чем $R(D)$ на определенную величину δ . Возможно уменьшение R_B , если осуществить энтропийное кодирование кодовых векторов. Для блочного кода взаимная информация, $I(X^k, Y^k)$, равна энтропии выхода квантователя, $H(Y^k)$. Тогда скорость R_B , при энтропийном кодировании будет равна $H(Y^k) \cdot R_B$ является верхней границей R_B , а нижняя граница может быть достигнута при энтропийном кодировании.

При фиксированном k и заданной скорости R_B , наименьшая погрешность D_{\min}^k , достигается при векторном квантовании с энтропийным кодированием. Для квантования нет ограничения на N , значение которой определяется практической целесообразностью, для фиксированного N и при $n=1, k=1$ получаем так называемое скалярное или одномерное квантование, для которого существует недетерминированный квантователь [120], (для такого квантователя существует ненулевая вероятность того, что точка из одной ячейки квантователя может быть присвоена к другой ячейке квантователя). Скорость такого квантователя приближается к функции скорость-погрешность, для любой погрешности большей чем D_{\min}^k [120].

Несмотря на то, что такой квантователь непрактичен, методы кодирования с памятью, которые используют недетерминированные квантователи, дают такие же результаты как детерминированные [120].

В общем случае, для достижения $R(D)$ следует использовать блочное кодирование, даже если источник без памяти. Хотя существует заблуждение, что если источник без памяти, то можно достичь $R(D)$ при скалярном квантовании. Однако, как уже отмечалось, это возможно, если использовать недетерминированные коды. Тем не менее, относительный выигрыш с увеличением k может быть малым, для



векторного источника без памяти и даже для источника с памятью, если значение k велико. Векторное квантование является практически способом блочного кодирования, которое позволяет приблизить скорость векторного квантователя к $R(D)$.

1.3. Общая теория векторного квантования

Векторное квантование (ВК) обычно осуществляется для стационарного скалярного источника. Вектор формируется с помощью объединения выхода источника в блоки. Как было уже отмечено ранее, векторный источник без памяти, полученный посредством объединения в блоки скалярного источника, может быть стационарным, даже если скалярный источник является нестационарным. В дальнейшем будем предполагать, что квантуемый источник является стационарным векторным источником без памяти с размерностью k .

Если источник стационарный с выходом x_i , процесс $\{x_i\}$ объединяется в блок, как $X_l = x_{ki+l}$, где $l = 1, 2, \dots, k$, для формирования векторного процесса $\{X_l\}$. Если источник векторный, без памяти, то его выходы будем обозначать через X_l . X_l принимает значения из пространства X и имеет плотность распределения $P(X)$. Здесь X обозначает любое значение случайной переменной. Кодовая книга C представляет собой множество N - точек $\{Y_j\}$ в пространстве Y . N будем называть размером (объемом) кодовой книги или размерностью ВК.

Векторный квантователь $Q(X)$ отображает пространство X во множество C . ВК размером N будем обозначать как $Q_N(.)$, которая может быть разделена на две функции, на кодер и декодер. Кодер определяется как

$$G(X) : X \Rightarrow j = \{1, 2, \dots, N\} \quad , \quad (1.3.1)$$

а декодер



$$H(I) = j \Rightarrow U \subset Y \quad (1.3.2)$$

Множество $\{S_j\}_{j=1}^N$ описывает разделение пространства X . Каждая S_j называется ячейкой квантования, а Y_i называются выходными точками или кодовыми векторами. Основные свойства кодера и декодера ВК исследованы в работе [79]. Для построения структуры оптимального ВК введем меру погрешности между X и Y . Обычно в качестве меры погрешности используется неотрицательная функция $d(X, Y)$. Качество ВК, размером N , оценивается ожидаемым уровнем искажений $D_N = M[d(X, Q(X))]$. Для эргодического источника D_N будет приближаться к средней погрешности, когда кодируется длинная последовательность выхода источника.

Другим важным параметром ВК является его скорость. Скорость ВК R_B можно определить как $\log_2 N$ и показывает число бит, необходимое для однозначного описания кодовых векторов кодовыми словами одинаковой длины. Если вероятности появления кодовых векторов равны, то такое кодирование является оптимальным. Если же вероятности появления кодовых слов не равны, то для оптимального кодирования целесообразно использовать энтропийное кодирование [121]. Достижимая скорость, при этом, зависит от плотности распределения вероятности выхода ВК и ограничена сверху значением R_B и снизу – энтропией $H(Q(X))$, которую обозначим через R_g и эта величина будет определять скорость ВК. Для достижения скорости R_g существуют различные методы энтропийного кодирования, которые в то же время увеличивают задержку, необходимую для кодирования. Однако, следует учитывать, что такое кодирование увеличивает задержку кодирования и скорость бит будет не постоянной. Для выравнивания скорости целесообразно использовать буферное запоминающее устройство, в котором следует учитывать такие явления как переполнение и незаполнение буфера. Эти факторы в свою очередь усложняют ВК источника.

Следует отметить, что когда $k \Rightarrow \infty$ скорость ВК приближается к функции скорость-погрешность, необходимость энтропийного кодирования отпадает.

Проблему минимизации скорости ВК можно разделить на две части: одна скорость ВК определяется как $R_B = \min_{Q_N(\cdot)} M[d(X, Q(X))]$, а вторая - $R_\Theta = \min_{H(Q(X)) \leq R_\Theta} M[d(X, Q(X))]$. В каждом случае, тот квантователь, который обеспечивает минимум погрешностей является оптимальным ВК, при заданных ограничениях. Существование оптимального ВК для скорости R_B , с различными мерами погрешности исследовались в работах [123, 124]. Следует учитывать, что размерность ВК, $-N$, не влияет на скорость R_Θ .

Если осуществить энтропийное кодирование выхода ВК, то эффективной скоростью при этом будет R_Θ , а при кодировании с фиксированной скоростью выхода ВК скорость определяется значением R_B , с учетом минимизации погрешности $d(X, Q(X))$.

Построение оптимального ВК с постоянной скоростью требует рассмотрения двух обязательных условий оптимальности, которые являются обобщениями условий Ллойда для скалярного квантования, на многомерный случай [122, 124]. Первое условие заключается в следующем: задана кодовая книга C в пространстве Y , ищется оптимальное разделение $\{S_j\}$ в пространстве X , которое минимизирует погрешность D_N . Такое правило называется правилом ближайшего соседа (ПБС), которое состоит в следующем: точка X из пространства X принадлежит к ячейке S_i , если погрешность между X и Y_i меньше, чем погрешность между X и любым $Y_i \in C$ т.е.

$$S_j = \{X : X \in X \text{ и } d(X, Y_j) \leq d(X, Y_i)\} \quad (1.3.3)$$

Такое разделение на основе ПБС называется разделением Дирихле

или Вороного, а ячейки называются ячейками Вороного.

Поскольку, ячейки $\{S_j\}$ не имеют определенную геометрическую структуру, в общем случае, их довольно сложно описать. Для заданного ВК, кодирование входного вектора X осуществляется с использованием ПБС, для определения S_j , которому принадлежит X .

Второе обязательное условие оптимальности ВК, при известном разделении, заключается в определении кодовой книги C . Общая погрешность D_N минимизируется, если минимизирована погрешность в каждой ячейке. Вклад погрешности любой ячейки S_j в общую погрешность минимизируется, если Y_j выбраны по следующему правилу

$$M[d(X, Y_j) | X \in S_j] \leq M[d(X, Y) | X \in S_j] \text{ для } Y \in Y, \quad (1.3.4)$$

если $X = Y$, то $Y_j \in S_j$, так как средняя погрешность для точки, находящейся внутри S_j всегда меньше, чем для точки вне этой ячейки. В этом случае Y_j является центроидом ячейки S_j и обозначается $\text{cent}(S_j)$. Существование центроида для широкого класса мер погрешности вытекает из доказательства существования оптимального квантователя [122], поскольку, каждая центроида это оптимальное ВК единичной размерностью для $p(X | X \in S_j)$. Два необходимых условия оптимальности можно объединить в одно: для оптимального ВК, выходные точки должны быть центроидами оптимального разделения, которые генерируются теми же выходными точками.

Как показал Ллойд [124], при $k = 1$ эти два условия обеспечивают существование локально-оптимального квантователя и не обеспечивают построения глобально оптимального квантователя. Если $p(X)$ и $d(X, Y)$ дифференцируемые функции, то в некоторых специальных случаях, локальный минимум одновременно является и глобальным минимумом [125] (эти условия приводятся в главе 2).

Достижение скорости R_Θ , при известных ограничениях, является

более сложной задачей. Выходная энтропия ВК определяется исключительно правилом разделения на ячейки. Для заданного разделения выходные значения определяются центроидами. С другой стороны для заданной кодовой книги C , ПБС не гарантирует обеспечение минимальной выходной энтропии, тем более, что оптимальное значение N , которое дает минимальную энтропию не известно. Для скалярного квантования ($k=1$), такая задача была решена при различных значениях N [126].

1.4. Алгоритм векторного квантования и оценка его оптимальности

Оптимальный алгоритм ВК основан на использовании итерационного обобщенного алгоритма Ллойда [124] для многомерного случая, который был предложен впервые в работе Линде, Бузо и Грей [78]. Обычно, этот алгоритм обозначается как ЛБГ алгоритм. Алгоритм работает, как при известной плотности вероятности $p(X)$, так и для обучающей последовательности (ОП). Обычно ЛБГ алгоритм используется для ОП, так как реальная многомерная плотность вероятности сигналов практически не известна. Алгоритм ЛБГ состоит из следующих шагов:

- 1) Выбирается начальная кодовая книга C_0 из N кодовых векторов. Вычисляется среднее искажение D_0 для начальной кодовой книги. Устанавливается $i=1$.
- 2) Находится разделение Вороного. Для обучающей последовательности, это означает кластеризацию ОП на N кластеров.
- 3) Вычисляются центроиды новых кластеров. Это приводит к созданию кодовой книги C_i для i -ой итерации. Вычисляется погрешность D_i для новой кодовой книги.
- 4) Если $|D_i - D_{i-1}| / D_i < \varepsilon$, где ε заданный порог, то C_i является

что какая-то ячейка оказалась пустой, т.е. ячейка не будет содержать ни одного вектора. Выбор начальной кодовой книги C_0 определяет достижимый локальный минимум.

Рассмотрим двухмерный, случайный вектор с равномерным распределением в квадрате. Известно, что оптимальный квантователь для большого N , представляет собой решетку с шестиугольными ячейками [79]. В экспериментах по нахождению кодовой книги по алгоритму ЛБГ, нами были использованы начальные кодовые книги, построенные на основе прямоугольной решетки, что позволило уменьшить число итераций, необходимое для построения субоптимальной (локально-оптимальной) кодовой книги [3,5,32].

Рассмотрим некоторые методы выбора начальной кодовой книги, для алгоритма ЛБГ. Первый метод заключается в случайном выборе N кодовых векторов из ОП. Впервые этот метод был использован для алгоритма k - средних [128] и не требует вычислений для определения начальной кодовой книги. Хотя, как показали наши исследования [1,5,32], при таком выборе в начальной кодовой книге могут оказаться выборки, которые не являются репрезентативными.

Второй алгоритм использует метод "расщепления" [86] в этом случае сначала формируется кодовая книга размером равным единице, а затем находится центроида ОП. Вторым кодовый вектор формируется путем "расщепления" первого вектора. Процесс "расщепления" продолжается до тех пор пока не будет достигнуто построение кодовой книги заданного размера N . Для построения начальной кодовой книги требуется $\log_2 N$ - шагов. Третий алгоритм выбора начальной кодовой книги, основан на использовании мультипликативных кодовых книг [82]. Этот метод отличается более сложными вычислениями, чем предыдущие два метода и его применение для выбора начальных кодовых книг не всегда является практически целесообразным.

Для преодоления проблемы пустых кластеров была предложена модификация алгоритма ЛБГ [78]. Если число обучающих векторов в кластере равно нулю, то такой кластер отбрасывается. Вместо него осуществляется расщепление центроиды непустого кластера с наибольшей погрешностью на два кодовых вектора. Поскольку, такое разделение на две части уменьшит только общую ошибку, она не повлияет на сходимость ЛБГ алгоритма.

В нашей работе [32] используется метод случайного выбора начальной кодовой книги с последующей коррекцией. Было замечено, что после первой итерации пустые кластеры не появляются, они могут появиться на следующих шагах итераций. Для преодоления этой проблемы можно предположить модификацию вышеописанного метода. Если в кластере попадает один обучающий вектор, то он отбрасывается так же как и пустой кластер и происходит расщепление других непустых кластеров, чтобы заменить отброшенные кластеры. В наших экспериментах был использован описанный метод выбора начальной кодовой книги при погрешности $\varepsilon = 0,001$.

Оценка оптимальности ВК изображений в общем случае является сложной задачей для произвольной плотности распределения и произвольного значения N . Были получены асимптотические оценки оптимальности ВК при $N \Rightarrow \infty$ [98]. Эти результаты могут быть использованы как нижний предел погрешности ВК для малых значений N .

Минимальная погрешность для большого N при одномерном квантовании ($k = 1$) была впервые оценена в [129], для среднеквадратической меры погрешности, а затем в работах [66,67], для более общей меры погрешности. Для многомерного квантования $k > 1$ асимптотические оценки погрешности были произведены в работах [98,99]. Сравнения полученных границ погрешности с функцией скорость-погрешность произведены в [98].

Как показано в этих работах [98,99] оптимальный квантователь, для k -мерной равномерной плотности вероятностей, можно представить, как заполнение ячеек многогранниками в пространстве R^k . Выходные точки такого заполнения создают регулярную структуру, называемую решеткой. Необходимые условия оптимальности, при равномерной плотности вероятностей, удовлетворяются для решетчатых квантователей [79]. Однако, проблема состоит в том, что оптимальные решетки известны только для некоторых значений k . Для большинства мер погрешностей и большинства значений k , не известны также и оптимальные формы ячеек. Для степенной меры погрешности вида $(1/k)\|(\mathbf{X}-\mathbf{Y})\|^r$, где $r>1$ и $\|\cdot\|$ -норма в пространстве R^k , минимально достижимая погрешность D_1 , при $N \Rightarrow \infty$, ограничена снизу значением

$$D_1 \geq 1/(k+r)V_k^{-\beta} \cdot N^{-\beta} \left\{ \int [p(\mathbf{X})]^\alpha d\mathbf{X} \right\}^{1/\alpha}, \quad (1.4.1)$$

где V_k - объем сферы с единичным радиусом $\{u: \|u\| \leq 1\}$, $\alpha = k/(k+r)$ и $\beta = r/k$. Как показано в работе [130] для квадратичной меры погрешности ($r=2$) при $k \Rightarrow \infty$, интеграл из формулы (1.4.1) оценивается как

$$\left[\int [p(\mathbf{X})]^\alpha d\mathbf{X} \right]^{1/\alpha} \geq 2^{2h_\infty}, \quad (1.4.2)$$

где h_∞ - дифференциальная энтропия выборки источника, когда $k \Rightarrow \infty$. Было также показано, что при этом предел погрешности достигает нижнего предела Шеннона [97] и граница асимптотического квантования совпадает с функцией скорость-погрешность.

1.5. Оценка вычислительных затрат векторного

квантования изображений и субоптимальное кодирование

Эффективность оптимального ВК выше, чем эффективность других

известных методов блочного кодирования, с той же размерностью. Так, например, хорошо известный метод кодирования с преобразованием, можно рассматривать как блочное кодирование. Оптимальное ВК с заданным значением k и мерой погрешности, дает меньшее (или равное) значение погрешности, чем другие методы блочного кодирования. Так, кодирование с предсказанием можно рассматривать как кодирование с бесконечномерным блочным кодом, поскольку при этом методе можно использовать бесконечную память для предшествующих отсчетов. Экспериментальные исследования кодеров с предсказанием и ВК для Гаусс-Марковского источника показали, что эффективность ВК превосходит эффективность кодера с предсказанием в четыре раза [131].

Сложность ВК связана с большими вычислительными затратами и с требуемой емкостью памяти [82], что затрудняет выполнения ВК в реальном масштабе времени. Сложность любого алгоритма можно оценить числом выполняемых операций, таких как сложение, умножение и сравнение.

Для квантования с N -уровнями число операций по вычислению меры погрешности, необходимое для квантования одного входного вектора равно N . Каждый расчет искажений (для квадратичной меры) требует $k \cdot N$ операций умножения-сложения. Следовательно, вычислительные затраты на квантование каждого входного вектора составляют .

$$C_n = N \cdot k . \quad (1.5.1)$$

Если на каждый кодовый вектор при передаче отводится $B = R \cdot k = \log_2 N$ бит, то

$$C_n = k \cdot 2^{Rk} . \quad (1.5.2)$$

Таким образом вычислительные затраты возрастают экспоненциально с увеличением размерности k и числа бит R , затрачиваемых

на кодирование каждой координаты. Если для каждого параметра вектора требуется одна ячейка памяти, то в этом случае для емкости памяти можно вычислить, как

$$M_n = k2^{Rk}, \quad (1.5.3)$$

что совпадает с вычислительными затратами. Для оценки вычислительных затрат, на создание кодовой книги методом полного перебора, предположим, что для N -уровневого квантования при обучении используется A векторов, а число итераций равно I . Тогда для вычислительных затрат на этапе обучения будем иметь

$$C_o = N \cdot k \cdot A \cdot I = k \cdot 2^{Rk} \cdot A \cdot I. \quad (1.5.4)$$

Требуемая емкость памяти, необходимая для хранения всех обучающих векторов можно вычислить как

$$M_o = k(N+A). \quad (1.5.5)$$

Для построения достаточно достоверной кодовой книги требуется около 10-50 обучающих векторов [82], так, что требуемая емкость памяти в основном определяется числом обучающих векторов. Другой алгоритм построения кодовой книги основан на методе дихотомии, который заключается в разделении пространства таким образом, что для поиска кодового вектора, обеспечивающего минимальную погрешность, требуется $\log_2 N$ операций вместо N . Общие вычислительные затраты на k -операций умножения-сложения для метода дихотомии составляют

$$C_D = 2k \log_2 N = 2kV. \quad (1.5.6)$$

Эта величина линейно зависит от числа бит, что касается общей



требуемой памяти, в этом случае, она примерно удваивается по сравнению с методом полного перебора .

Для преодоления вычислительной сложности ВК, при увеличении размерности и скорости, были предложены субоптимальные методы ВК [132]. Эти методы можно разделить на две группы: методы, при использовании которых происходит увеличение скорости R и методы, при которых увеличивается размерность вектора k . В первом случае налагается ограничение на структуру кодовой книги, что позволяет уменьшить сложность вычислений, связанных с нахождением кодового вектора . Такие кодовые книги являются субоптимальными в общем случае. Методы второй группы используют корреляцию между k -мерными векторами. Методы первой группы при нахождении кодовых книг и кодирования, используют древовидную структуру кодовой книги и сложность вычислений линейно зависит от числа бит (см. выражение (1.5.6)).

Второй метод ВК, как и первый, относится к ВК без памяти, использует многомерную схему квантования [82]. В этом случае, число кодовых книг и квантователей зависят от числа ступеней ВК. Каждый последующий квантователь квантует векторы ошибки. Полная кодовая книга является суммой кодовых векторов каждой ступени. Следует отметить, что общие вычислительные затраты, в этом случае уменьшаются по сравнению с обычным ВК, так как, для заданного X выбор наилучшего кодового вектора происходит не из общей кодовой книги, а из его части. Так, если на первую ступень, двухкаскадного ВК, выделяется r_1 , а на вторую - r_2 бит, то общее число бит будет $r_1 + r_2 = kR$ и вычислительные затраты вместо $k \cdot 2^{Rk}$ сокращаются до $k \cdot (2^{kr_1} + 2^{kr_2})$. Требования на объем памяти также сокращаются.

При решетчатом ВК [110], решетка представляет собой множество векторов

$$\Lambda = \left\{ \mathbf{X} : \mathbf{X} = u_1 \mathbf{a}_1 + u_2 \mathbf{a}_2 + \dots + u_N \mathbf{a}_N \right\}, \quad (1.5.7)$$

где \mathbf{a}_i , $i=1,2, \dots, N$, базисные векторы решетки и u_i целые числа, можно найти быстрые алгоритмы нахождения ближайших точек решетки к входным векторам. В работе [84] найдены алгоритмы решетчатого квантования, вычислительная сложность которых пропорциональна $k \log k$ и $k^2 \log k$, и справедливы только для бесконечных решеток. Следует отметить, что сложность алгоритмов в этом случае не зависит от скорости R . Обратная задача нахождения точек решетки для заданного индекса кодового вектора была решена в работе [110]. В строгом смысле решетчатые квантователи оптимальны для процессов с равномерным распределением. Поэтому, целесообразно, до квантования осуществить нелинейное преобразование исходных данных так, чтобы распределение значений квантуемого сигнала приблизить к равномерному распределению.

Еще одним интересным методом квантования является ВК в сочетании с предсказанием [104]. В этом случае текущий вектор предсказывается с помощью предшествующих квантованных векторов. Разность между предсказанными и входными векторами подвергается векторному квантованию. Восстановленный вектор представляет собой сумму предсказанного и квантованного векторов ошибки. При таком кодировании, теоретически, система должна иметь бесконечную память, и она эквивалентна бесконечномерному ВК.

В работах [133, 134] был предложен метод ВК, основанный на конечном числе состояний. Эффективность этого метода ВК такая же как и при ВК с предсказанием.

1.6. Исследование методов сокращения вычислительных затрат при векторном квантовании ТВ изображений

Впервые алгоритм ВК, с использованием обучающей последовательности в виде гауссовского случайного процесса, был предложен в работе [78]. Однако, векторное квантование изображений требует дальнейшего исследования с целью повышения эффективности как создания кодовой книги, так и улучшения характеристик самого процесса ВК.

Рассмотрим процедуру ВК изображений. На рис.1.6.1 представлена структурная схема ВК изображений. Для моделирования ВК изображений в экспериментах использовались тестовые изображения размером 256×256 элементов. Одно из тестовых изображений "ЛЕНА", которое рекомендовано Ассоциацией "Кино и телевизионных инженеров" (SMPTE), представлено на рис.1.6.2. Значения уровней изображения находятся в диапазоне от 0 до 255, каждое значение представлено с точностью 8 бит. Коэффициент сжатия и скорость ВК всегда будет оцениваться по отношению этой величины. Исследования, проведенные в данной диссертационной работе касаются создания ВК для эффективного кодирования источника изображения, предназначенного для видеоконференцсвязи, хранения изображения и ее передачи. Во всех перечисленных случаях, конечным звеном системы, получателем информации, является зрительная система человека. Экспериментально показано, что 64 уровня (6 бит/эл) градации яркости достаточно для нормального воспроизведения черно-белых изображений. Исходя из этого, тестовое изображение с точностью представления 8 бит/эл, можно считать исходным, неквантованным изображением. Если размер элемента изображения не больше 1 минуты, то такой элемент глазом не воспринимается раздельно. При выполнении этих условий, глаз не будет заме-

чать пространственную дискретность изображения и такое тестовое изображение можно считать хорошей моделью исходного реального изображения.

Обычно ТВ изображения имеют большую пространственную корреляцию. Средний коэффициент корреляций между элементами изображения обычно находится в пределах 0,9 – 0,95 [36,51]. На рис.1.6.3 представлена автокорреляционная функция изображения, показанного на рис.1.6.2. Такая высокая корреляция позволяет значительно сократить число бит на элемент изображения, без значительной потери качества последнего.

В нашей работе источник изображения будем представлять в виде двумерной пространственной структуры. Вначале рассмотрим разделение исходного изображения на прямоугольные блоки, элементов изображения, которые обрабатываются как единое целое. Допустим, что блок (x, y) имеет x строк и y столбцов. Элементы блоков удобно представить в виде вектора. Если $A = [A_{ij}]$ блок элементов изображения, где A_{ij} значение (ij) -го элемента в блоке (x, y) . Одномерный вектор \bar{A} этого блока можно представить в виде

$$\bar{A} = [A_{11} A_{21} \dots A_{x1} A_{12} A_{22} \dots A_{x2} \dots A_{1y} A_{2y} \dots A_{xy}]^T \quad (1.6.1)$$

Достоинством представления изображений в векторной форме является большая компактность записи и возможность непосредственного использования методов, разработанных для обработки одномерных сигналов. При ВК изображений осуществляется формирование блоков элементов (X, Y) , затем по методу ЛБГ строится кодовая книга (алгоритм ЛБГ описан в 1.4). При кодировании

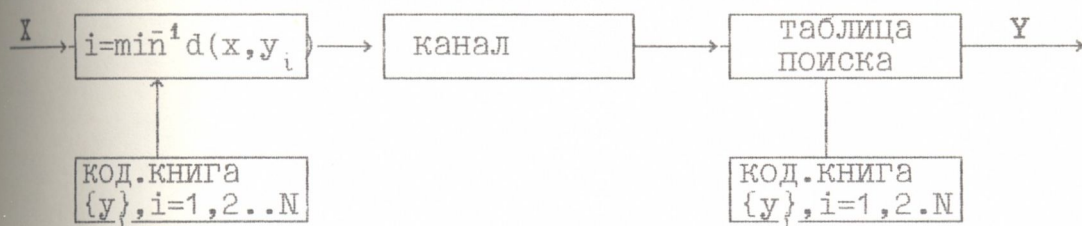


Рис.1.6.1. Структурная схема векторного квантования

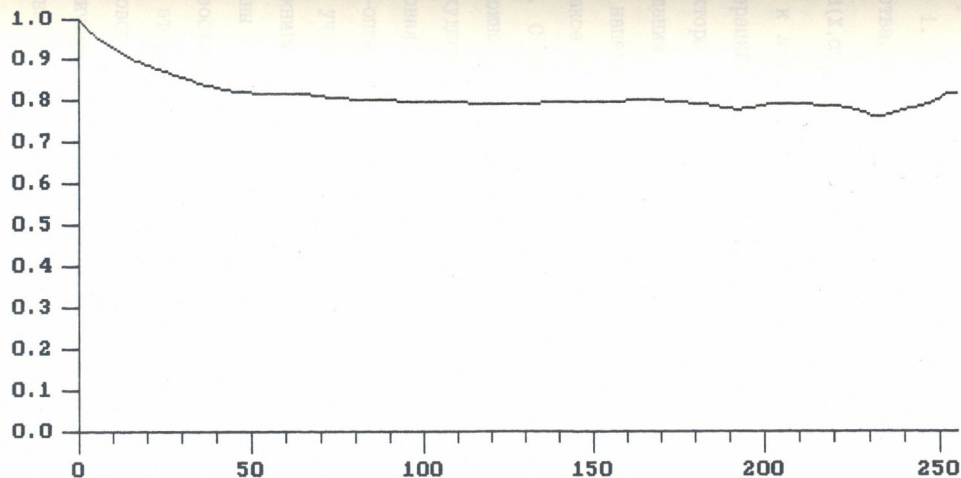
осуществляется сравнение блока изображения с кодовой книгой, выбор кодового вектора осуществляется по принципу наименьшей погрешности и зависит от меры погрешности. Этот метод называется правилом минимальной погрешности и он является оптимальным с точки зрения минимизаций средней погрешности [78]. На приемной стороне имеется такая же кодовая книга, как и на передающей части, и кодер источника передает только индекс выбранного кодового вектора. В декодере находится таблица поиска, с помощью которой выбирается соответствующий кодовый вектор и происходит заполнение соответствующей части изображения кодовыми векторами. Число бит приходящий на элемент изображения или скорость ВК, определяется размером кодовой книги N и размерностью кодового вектора k , следующим образом

$$R = \log_2 N / k, \quad (1.6.2)$$

где k – размерность вектора. Вышеописанный алгоритм ВК представляет собой квантование в пространственной области. Размерность блока в этих случаях выбирается небольшим (обычно порядка 4×4), и по этому для ВК требуется память на несколько строк. По сравнению с кодированием с преобразованием, который требует сложных операций преобразования в декодере, ВК при декодировании использует только таблицу поиска. Сложности при ВК возникают на передающей части, которые связаны с выбором "хороших" кодовых векторов. Если эту процедуру осуществить на основе древовидного поиска, время кодирова-



Рис. 1.6.2 Тестовое изображение "ЛЕНА"



Auto Correlation for LENNA.OBR

Рис. I.6.3 Автокорреляционная функция
 для тестового изображения

ния линейно увеличивается с увеличением размера кодовой книги.

Для создания кодовой книги $C = \{Y_i, i = 1, 2 \dots N\}$ векторов Y_i , которая представляет вектор источника X наилучшим образом, в смысле выбранной меры погрешности, следует выполнить несколько условий. Из кодовой книги C выбирается кодовый вектор Y_i , который удовлетворяет правилу ближайшего соседа, $d(X, Y_i) \leq d(X, Y_j)$ для всех $j \neq i$. В наших экспериментах X и Y выбиралось из k -мерного пространства, R^k . Если $d(\cdot, \cdot)$ выпуклая функция

$$d(X, \alpha Y_1 + (1-\alpha)Y_2) \leq \alpha d(X, Y_1) + (1-\alpha) d(X, Y_2), \quad (1.6.3)$$

сходится к локально-оптимальному квантователю, за конечное число шагов итераций. Как было уже отмечено в разделе 1.4, найденные кодовые векторы представляют собой центроиды ячейки Вороного. Процедура создания кодовой книги продолжается пока погрешность не достигает наперед заданной величины ε , или станет меньше этого значения. Такое построение кодовой книги известно, как метод полного перебора. С точки зрения уменьшения времени нахождения кодовой книги, можно использовать древовидный поиск, хотя при этом несколько ухудшаются характеристики ВК.

Кодовая книга, найденная на основе алгоритма ЛБГ, является локально-оптимальной для обучающей последовательности. В этой связи, если учесть, что основное время вычислений уходит на создание кодовой книги и время обработки линейно увеличивается, с увеличением длины обучающей последовательности, важно определить минимально необходимую длину последовательности. В наших экспериментах [1,5,32] это число бралось от 10 до 50 обучающих векторов для каждого кодового вектора. Если число обучающих векторов брать меньше этой величины, то при кодировании тех источников, представители которых не входят в обучающую последовательность, могут вызвать

значительное возрастание ошибки ВК.

Как уже было отмечено, на результаты квантования большое влияние оказывает и выбор начальной кодовой книги. Выбор начальной кодовой книги нами осуществлялся на основе метода дихотомии [82]. На каждом этапе разделения размер кодовой книги увеличивается вдвое пока не достигает заданного размера N . Поскольку кодовая книга малого размера, созданная в процессе разделения, является промежуточной, то для него было не целесообразно использовать такой же порог ε как и для конечной кодовой книги.

В наших экспериментах, с целью уменьшения времени нахождения конечной кодовой книги, использовались два порога. Один начальный $\varepsilon_n = 0,001$ и второй конечный $\varepsilon_k = 0,0001$, который в 10 раз меньше начального порога.

При моделировании ВК ТВ изображений был использован компьютер IBM PC-AT 386. Программы были созданы на языке С.

Для уменьшения времени обработки при кодовых книгах большого размера (512 или 1024) использовались, так называемые мультипликативные коды [82]. Этот метод позволяет сократить время поиска и емкость памяти. Мультипликативный код формируется как декартово произведение кодовых книг. Допустим, что имеем m кодовых книг, C_i , $i=1,2 \dots m$, каждый из которых состоит из кодовых векторов M_i с размерностью k_i и обозначается как j_i . Эти Векторы формируют мультипликативную кодовую книгу путем каскадного объединения m кодовых векторов из кодовой книги C_i . Каждый кодовый вектор мультипликативной кодовой книги будет иметь размерность $k = (k_1 + k_2 + \dots + k_m)$ и индексы $j = j_1 j_2 \dots j_m$ (все индексы каскадно объединены). Размер кодовой книги будет, равен произведению размеров кодовых книг $m = (m_1)(m_2) \dots (m_m)$ и общая скорость будет равна $(\log_2 m)/k$ бит на размерность. Мультипликативная кодовая книга имеет два преимущества.

Первое связано с тем, что эффективность ВК увеличивается с увеличением размерности кодового вектора. Это особенно важно при кодировании источников изображений с помощью ВК, поскольку изображения обычно сильно коррелированы. Мультипликативные кодовые книги могут использовать эту корреляцию за счет увеличения размера блоков. Второе преимущество состоит в том, что мультипликативная кодовая книга субоптимальна по сравнению с кодовой книгой того же размера, найденного методом полного перебора, но за счет большого размера, ее эффективность превосходит эффективность обычного ВК.

Результаты нашего моделирования [1,5,32,36] показали, что для выбора начальной кодовой книги более эффективно использовать метод "ближайшего соседа", который был предложен в работе [86]. Идея этого алгоритма заключается в следующем. В начале, вся обучающая последовательность (обучающие векторы) рассматриваются как начальные кластеры. Затем два "ближайших" кластера объединяются в один и заменяются новым кластером, который представляет собой взвешенное среднее значение двух кластеров. После объединения число кластеров уменьшается на одну единицу. Этот процесс продолжается, пока количество кластеров не достигнет требуемого числа. Для уменьшения количества вычислений используется k -мерное дерево обучающих векторов. При создании k -мерного дерева "похожие" векторы группируются в направлении одинаковой ветви, что позволяет проводить поиск в ограниченной области дерева для нахождения ближайшего вектора. Время вычисления при использовании этого метода сократилось на 5% по сравнению с обычным ЛБГ. Как показали наши исследования [5,32,36] этот метод целесообразнее использовать для нахождения начальной кодовой книги, а затем использовать алгоритм ЛБГ для создания окончательной кодовой книги, что позволило уменьшить число итераций на 40-50%, по сравнению с тем случаем, когда

начальная кодовая книга выбралась случайным образом. В экспериментах использовалось различное число обучающих векторов, приходящих на один кодовый вектор M и различное количество блоков, приходящих на обучающие векторы M_1 . Результаты моделирования сведены в таблицу 1.6.1 где в последней колонке представлены значения относительного уменьшения среднеквадратической ошибки (СКО) в процентах, по сравнению экспериментом №1.

Анализ таблицы 1.6.1 показывает, что при увеличении числа обучающих векторов, СКО восстановленного изображения значительно уменьшается. Дальнейшее увеличение количества обучающих векторов приводит к увеличению вычислительных затрат, а ошибка восстановления уменьшается незначительно.

Одним из лучших показателей сложности векторного квантования ТВ изображений является число математических операций (умножение, сложение, сравнение, извлечение корня), которые следует выполнять для каждого входного вектора. Для краткости записи этих

Таблица 1.6.1.

№ ЭКСПЕ- РИМЕН- ТОВ	ЧИСЛО ОБУЧАЮЩИХ ВЕКТОРОВ НА ОДИН КОДОВЫЙ ВЕКТОР M	ЧИСЛО БЛОКОВ НА КОЛИЧЕСТВО ОБУ- ЧАЮЩИХ ВЕКТОРОВ M_1	ОТНОСИТЕЛЬНОЕ, ПО СРАВНЕНИЮ С ЭКСПЕ- РИМЕНТОМ №1, УМЕНЬ- ШЕНИЕ СКО %
1.	4	40	-
2.	8	20	2.81
3.	16	10	7.96
4.	24	7	14.28
5.	40	4	18.03

математических операций удобно использовать аббревиатуру УССИ, составленную из первых букв вышеперечисленных операций. Число та-

ких логических операций, как если, меньше чем и т.д. составляют малую часть вычислений по сравнению с числом математических операций и их можно не учитывать. Требуемый объем памяти, как уже было отмечено, играет важную роль, однако при заданном объеме памяти все же решающим фактором является сложность поиска.

Для наиболее распространенного алгоритма ВК с полным перебором (ПП) число основных математических операций УССИ равно kN , $2kN$, k , 0 соответственно. Здесь k обозначает размерность вектора, а N - кодовой книги. Простой алгоритм уменьшения сложности вычислений при ВК основан на использовании т.н. "частичного расстояния" ЧР. Этот алгоритм позволяет обойти операцию умножения, который обычно требует значительных временных затрат на вычисления. ЧР при $1 \leq k$ определяется на основе следующего выражения:

$$d(X_n, Y_i) = \sum_{j=1}^l (X_{nj} - Y_{ij})^2 \quad (1.6.4)$$

где $\{X_n = [x_1, x_2, \dots, x_k]_n, 1 \leq n \leq M\}$ есть множество исходных векторов в кадре, $\{Y_i = [y_1, y_2, \dots, y_k]_i, 1 \leq i \leq N\}$ - множество кодовых векторов. Использование этого метода позволяет уменьшить количества вычислений в среднем на 15% по сравнению с алгоритмом ПП.

Другим способом уменьшения сложности вычислений может служить использование подходящей меры искажений (ММ). При использовании алгоритма ЛБГ в качестве меры, обычно используется среднеквадратичная ошибка (СКО)

$$d_{\text{ско}}(X, Y) = (1/k) \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2. \quad (1.6.5)$$

Однако, для сокращения вычислительных затрат выгодно использовать среднюю абсолютно ошибку (САО)

$$d_{\text{сао}}(X, Y) = (1/k) \sum_{i=1}^k |x_i - y_i|, \quad (1.6.6)$$

и критерий минимакса (ММ)

$$D_{mm} = (1/m) \sum_m \min_i d(X_n, Y_i) , \quad (1.6.7)$$

где $\min_i d(X_n, Y_i) = \min_i (\max_k |x_k - y_k|)$.

Следует отметить, что при использовании САО не требуется проведения операций умножения. Однако, как показали наши исследования [27,32] время обработки при этом уменьшается незначительно. При использовании критерия ММ число умножений снижается до нуля, а число сложений сокращается на 50% по сравнению с методом полного перебора, но увеличивается число сравнений в 16 раз (1.2.3). Результаты моделирования показали [3,5,36], что использование в качестве меры искажений САО и критерия ММ позволяет достигнуть одинакового сокращения времени вычислений, но при критерии ММ пиковое отношение сигнал-шум уменьшилось на 0,49 дБ по сравнению с тем случаем, когда используется САО. Пиковое отношение сигнал-шум вычисляется по выражению

$$\gamma_1 = 10 \lg [255^2 / (1/n \times m) \sum_{i=1}^{n \times m} (x_i - y_i)^2] \quad (1.6.8)$$

Другой алгоритм сокращения времени вычислений основан на разделении общей кодовой книги на несколько подкниг, на основе контурно-текстурной модели изображений, с помощью классификатора (подробно эти вопросы исследованы в главе 3). Поскольку поиск кодового вектора происходит внутри подкниги, а не в общей кодовой книге, время обработки будет сокращаться. В наших исследованиях [5,27,32] использовалась классификация на 15 подкниг. Результаты моделирования показали, что при классифицированном ВК [32] время обработки значительно сокращается.

Для повышения эффективности процесса ВК ТВ изображения нами был предложен эффективный метод сокращения объема вычисления, основанный на критерии минимума среднеквадратической ошибки [116]. Алгоритм заключается в следующем. Для каждого кодового вектора Y_i

находим $r_i = \sqrt{d_i}$, где

$$d_i = \max_{x_n \in S_i} d(X_n, Y_i) \quad |_{i=k} \quad (1.6.9)$$

$$S_i = \left\{ X_n : d(X_n - Y_i) \leq d(X_n - Y_j) \right\}, \text{ для } i \neq j$$

$$i, j = 1, 2 \dots N$$

$$n = 1, 2 \dots M$$

Затем, если для заданного входного вектора X , выполняется условие

$$|X_j - y_{ij}| > r_i \quad (1.6.10)$$

для $j \in \{1, \dots, k\}$, то можно быть уверенным, что y_i - не является ближайшим к вектору X . Кроме того, если до проверки выше приведенного условия, для Y_i , наименьшая ошибка, была равна d , тогда Y_i не может быть "лучшим" вектором если

$$|X_j - y_{ij}| > \sqrt{d}. \quad (1.6.11)$$

Таким образом при кодировании входного вектора X мы можем отбросить кодовое слово y_i , если

$$|X_j - Y_{ij}| > r'_i, \quad (1.6.12)$$

где $r'_i = \min(r_i, \sqrt{d})$. При практическом использовании этого алгоритма сначала определяем d_i и r_i , используя достаточно длинную представительную обучающую последовательность векторов. Найденные значения сортируются по возрастающему порядку. Эта процедура предшествует началу процесса кодирования. Для кодирования входного вектора X_n , начинается проверка с первого кодового вектора с наименьшим r_i и находим кодовый вектор, удовлетворяющий условию:

$$|X_{nj} - Y_{ij}| \leq r_i, \quad j \in \{1, 2 \dots k\}. \quad (1.6.13)$$

После нахождения такого кодового вектора, начинается вычисле-

ние расстояния $d(X_n, Y_i)$. Если для некоторого $1 < k$ ЧР превышает d_i , то кодовый вектор Y_i отбрасывается как неподходящий, завершая процесс вычисления расстояния. Если ЧР меньше, чем d_i для $i = k$, Y_i выбирается в качестве пробного кодового вектора и продолжается поиск лучшего значения среди оставшихся кодовых векторов в кодовой книге. Для оставшихся кодовых векторов вместо r_i будем использовать $\sqrt{d_i}$, где d_i — наименьшее расстояние на первом этапе поиска. Однако, может случиться так, что на первом этапе не удастся найти подходящий кодовый вектор для продолжения процесса поиска. В этом случае приходится использовать метод III для нахождения наилучшего кодового вектора.

Результаты моделирования вышеизложенного алгоритма показали значительное увеличение в пиковом отношении сигнал-шум (γ_1 , увеличилась на 5–6 дБ) по сравнению с алгоритмом, предложенным в работе [116]. В нашем случае [4] время обработки незначительно увеличилось. Результаты моделирования сведены в таблицу 1.6.2..

Среди методов быстрого поиска кодовой книги и ВК алгоритм классифицированного ВК (КВК) можно считать наилучшим с точки зрения скорости, как при создании кодовой книги, так и при кодировании. КВК обеспечивает хорошее субъективное качество восстановленных ТВ изображений [27, 32, 80], но при этом требует наличия классификатора. Метод ЧР дает хорошие результаты с точки зрения, как скорости, при создании кодовой книги и кодирования, так и относительной простоты его реализации. Практически этот метод не ухудшает субъективного качества восстановленных ТВ изображений и одновременно позволяет сократить время обработки по сравнению с III. Алгоритмы с использованием различных критериев меры искажений практически не дают никакого выигрыша, т.к. время обработки сокращается незначительно, а субъективное качество восстановленных ТВ

Таблица 1.6.2

Наименование алгоритмов N=1024, k=4x4		УССИ				Время обработ- ки (сек)	γ_1 (дб)
		X	+ (-)	срав.	✓		
ПП		16384	32768	1024	0	776	32.59
ЧР		2394	4787	2401	0	168	32.59
САО		0	32768	1024	0	595	32.36
ММ		0	16384	17408	0	602	31.87
КВК		697	1395	6	0	50	31.97
МСКО	В [116]	185	2041	2041	2	110	26.71
	модифиц.	835	4027	4027	8	210	32.29

изображений несколько ухудшается. Что касается объективных показателей так, например, γ_1 , при критерии ММ и МАО снижается на 0.7 дб и 0.2 дб по сравнению с ПП соответственно, а время обработки обоих методов сокращается в среднем на 14% по сравнению с методом полного перебора.

Результаты

заключение:

1. По

этого кодиро

вступает в

относительно бли

скорость-в

решенный ал

решенности

ность про

2. У

разно ис

позволяющ

лишь на

Выводы к главе 1

Глава 1 содержит результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований уменьшения вычислительных затрат при создании кодовых книг векторного квантования ТВ изображений.

Оригинальными материалами, обладающими авторским приоритетом в данной главе являются:

1. Исследование векторного квантования ТВ изображений, как метода оптимального кодирования источника и оценка эффективности алгоритма векторного квантования.
2. Исследование методов выбора начальной кодовой книги и оценка вычислительных затрат при векторном квантовании ТВ изображений.
3. Исследование влияния различных алгоритмов ВК на время обработки и качество восстановленных ТВ изображений.

Результаты исследований, изложенные в данной главе, дали возможность:

1. Показать, что векторное квантование является методом блочного кодирования источника сигнала и при достаточно большом k , существует векторный квантователь с погрешностью равной D_k сколь угодно близкой к D и скоростью произвольно близкой к функции скорость-погрешность $R(D)$. Установить, что предложенный модифицированный алгоритм создания кодовой книги, на основе уменьшения вероятности появления пустых кластеров, позволяет повысить эффективность процесса создания кодовых книг.

2. Установить, что для выбора начальной кодовой книги целесообразно использовать модифицированный метод "ближайшего соседа", позволяющий сократить вычислительные затраты при создании кодовой книги на 40-50% по сравнению с тем случаем, когда начальная кодо-

вая книга выбирается случайным образом.

3. Показать, что когда число обучающих векторов, приходящих на один кодовый вектор больше, чем число блоков, приходящих на количество обучающих векторов, среднеквадратическая ошибка уменьшается на 18%.

Показать, что использование психовизуальных свойств зрения позволяет уменьшить вычислительные затраты, как при создании кодовой книги, так и при квантовании ТВ изображения в 10-12 раз по сравнению с алгоритмом полного перебора. Модифицированный метод, с использованием вероятностных характеристик и свойств векторного пространства кодовых векторов, позволяет снизить время обработки в 5-7 раз, по сравнению с алгоритмом полного перебора и увеличить отношение сигнал-шум на 5...6 дБ, по сравнению с известным быстрым алгоритмом ВК.

Г Л А В А 2

ОДНОМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ ТВ ИЗОБРАЖЕНИИ

2.1. Задача исследования

Оптимальное квантование сигналов изображений, с точки зрения уменьшения скорости передачи сигналов, может быть осуществлено, как на основе одномерного (скалярного) квантования, так и на основе многомерного (векторного) квантования сигналов изображений и посредством сочетаний этих двух способов квантований.

Не смотря на то, что вопросы скалярного квантования исследуются довольно долгое время [57,59,67,68], ряд вопросов, касающихся совместного использования статистики квантуемых сигналов и свойства зрительного восприятия искажений квантования, а также вопросы совместного использования скалярного и векторного квантований для сигналов изображений требуют дальнейших исследований.

В существующих работах по кодированию изображений [45-47,53], мало внимания уделяется исследованию вопросов робастность скалярного и векторного квантования сигналов изображений. Не достаточно исследованы вопросы практической целесообразности перехода от скалярного квантования к векторному. При исследовании этих вопросов, недостаточное внимание уделяется и использованию свойств зрительного восприятия при рандомизированных процедурах квантования. Не достаточно исследованы вопросы неравномерного квантования сигналов изображений с различными числовыми характеристиками (дисперсия, пик-фактор), при оценке выигрыша, полученного за счет перехода от равномерного квантования к неравномерному как при скалярном, так и при сочетании скалярного квантования с векторным.

Целью настоящей главы является оценка потенциального выигрыша при переходе от равномерного квантования к неравномерному, для скалярного квантования в сочетании с векторным квантованием и выделение класса сигналов изображений, для которых неравномерное квантование наиболее эффективно;

оценка робастности квантования сигналов изображений на основе различных критериев оптимальности, когда вероятностные характеристики квантуемых сигналов точно не известны;

Оценка параметров квантования сигналов изображений с учетом пороговых свойств зрительного восприятия специфических искажений квантования.

Исследование эффективности векторного квантования в сочетании со скалярным квантованием сигналов изображений.

2.2. О точностных критериях при квантовании

ТВ изображений

В большинстве работ по квантованию изображений оценка оптимальности процесса квантования производится на основе критерия минимума среднеквадратичной ошибки. Вместе с тем, представляет интерес введение более общего критерия оценки и построение на его основе процедуры определения оптимальных параметров квантования.

С этой целью к вопросу неравномерного квантования сигналов можно подойти с позиции теории статистических решений [135]. Предположим, что квантованию подвергается сигнал, представляющий собой стационарный случайный процесс.

Под оптимальным квантованием на N уровней будем подразумевать такое, которое будет наилучшим среди всех квантователей на N уровней в смысле выбранного критерия.

Пусть сигнал принимает значение в интервале $[-1, +1]$ и имеет плотность вероятностей значений $W(x)$. Для осуществления оптимального квантования требуется разбить диапазон возможных значений сигнала на N уровней с помощью порогов $\{x_k\}$ ($k=1,2,3,\dots,N-1$) и уровней $\{y_k\}$ ($k=1,2,3,\dots,N$) квантования, полагая при этом, что $x_0 = -1$ и $x_N = +1$.

В качестве критерия оценки оптимальности процесса квантования выберем функцию потерь $\Pi(x,y)$, где x соответствует порогу, а y - уровню квантования.

Учитывая, что x и y являются случайными величинами, в качестве функции оценки примем математическое ожидание $\overline{\Pi(x,y)} = R$, где черточка сверху означает усреднение по множеству реализаций, т.е.

$$R = \int_{-1}^{+1} dx \int_{-1}^{+1} \Pi(x,y) W(x,y) dy. \quad (2.2.1)$$

Наилучшим назовем квантователь, который обеспечивает минимум величины R . Очевидно, что это значение в общем случае будет зависеть от вида функций потерь $\Pi(x,y)$, причем, как было уже отмечено, наиболее распространенной является квадратичная функция

$$\Pi(x,y) = (y-x)^2 \quad (2.2.2)$$

В общем случае функция $\Pi(x,y)$ может иметь самый различный вид в зависимости от предъявленных требований к квантованию. Однако во всех случаях она должна характеризовать потери при замене значения x значением y .

Допустим, что функция потерь $\Pi(x,y)$ удовлетворяет некоторым общим требованиям: $\Pi(x,y) \geq 0$; $\Pi(x,x) = 0$, т.е. потери при $x=y$ равны нулю.

Оптимизация процесса квантования подразумевает минимизацию выражения (2.2.1).

Для нахождения оптимальных порогов и уровней квантования при известной одномерной плотности вероятности $W(x)$ надо найти минимум выражения

$$R = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} \Pi(x, y_k) W(x) dx, \quad (2.2.3)$$

который достигается при выборе порогов и уровней квантования на основе уравнений Макса [65]:

$$x_k = \frac{y_k + y_{k-1}}{2}, \quad (2.2.4)$$

$$y_k = \frac{\int_{x_k}^{x_{k+1}} x W(x) dx}{\int_{x_k}^{x_{k+1}} W(x) dx}. \quad (2.2.5)$$

Таким образом, оптимальные уровни представляют собой условные математические ожидания сигнала. Выражения (2.2.4), (2.2.5) являются уравнениями квантования при квадратичной функции потерь [135].

Квадратичная функция потерь, является частным случаем степенных функций потерь вида

$$\Pi(x, y) = |y_k - x|^\theta, \quad (2.2.6)$$

которая при $\theta = 2$ совпадает с выражением (2.2.2)

Кроме рассмотренного случая $\theta = 2$, представляет интерес случай $\theta = 1$. В этом случае получаем функцию потерь, которая аналогична критерию минимума среднего значения модуля ошибки.

При $\Pi(x, y_k) = |y_k - x|$ для среднего значения функции потерь имеем:

$$R = \overline{\Pi(x, y_k)} = \int_{-1}^1 |y_k - x| W(x) dx ,$$

ИЛИ

$$R = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} |y_k - x| W(x) dx =$$

$$= \sum_{k=1}^N \left[\int_{x_k}^{y_k} (y_k - x) W(x) dx - \int_{y_k}^{x_{k+1}} (y_k - x) W(x) dx \right]; \quad (2.2.7)$$

для условия минимума имеем:

$$\int_{x_k}^{y_k} W(x) dx - \int_{y_k}^{x_{k+1}} W(x) dx = 0 \quad (2.2.8)$$

Таким образом, оптимальные уровни представляют собой условные медианы величины x при условии, что вероятности $P(x_k, y_k)$ и $P(y_k, x_{k+1})$ равны между собой, т.е.

$$\int_{x_k}^{y_k} W(x) dx = \int_{y_k}^{x_{k+1}} W(x) dx. \quad (2.2.9)$$

Следует отметить, что система уравнений (2.2.4) и (2.2.5) обеспечивающая выбор оптимальных порогов и уровней квантования, не может быть разрешена аналитически, кроме тривиальных случаев, когда $W(x) = \text{const}$.

В связи с этим представляет определенный интерес решение задачи оптимального квантования на основе нелинейного преобразования сигналов с последующим нахождением параметров квантования, приведены в [20].

Решение задачи оптимального квантования связано с одной важной особенностью. При нахождении минимума функций $f(x)$, последняя в общем случае может иметь несколько локальных минимумов, т.е. при решении уравнений (2.2.4), (2.2.5) полученные результаты могут отличаться от глобального минимума, который может иметь функция R . В связи с этим возникает задача определения такого условия, при котором уравнение (2.2.3) будет иметь единственный минимум. Данная

задача для частного случая (при $\Pi(x, y) = (y - x)^2$) была исследована в работе [125].

Показано, что когда $W(x)$ удовлетворяет условию

$$\left[d^2 \ln W(x) / dx^2 \right] < 0, \quad (2.2.10)$$

все минимумы функции R являются глобальными.

Доказанное условие можно распространить на функции штрафов более общего вида: $\Pi(x, y_k) = |x - y_k|^\theta$ при $\theta > 0$ [136].

Уравнение (2.2.3) можно использовать для нахождения y_k в случае степенной функции потерь общего вида

$$dR / dy_k = \int_{x_k}^{x_{k+1}} \theta (y_k - x)^{\theta-1} W(x) dx, \quad (2.2.11)$$

откуда

$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} |x - y_k|^{\theta-1} W(x) dx = 0. \quad (2.2.12)$$

Как уже отмечалось, аналитическое решение (2.2.4), (2.2.5) и тем более (2.2.12) практически не представляется возможным. Поэтому, задачу оптимального квантования выгодно решать методами, которые упрощают эту процедуру. В частности, при нахождении оптимальных $\{y_k\}$ и $\{x_k\}$ можно воспользоваться функциями оптимальных преобразований для нахождения оптимальных порогов квантования, а затем на основе (2.2.5) найти уровни $\{y_k\}$ [19].

Будем искать нелинейное безинерционное преобразование, которое определяется с помощью функциональной связи:

$$y = f(x). \quad (2.2.13)$$

Отсутствие нелинейных искажений сигналов требует осуществления обратной функциональной связи на приемной стороне, т.е. должно выполняться условие

$$\varphi(y) = \varphi[f(x)] = Kx, \quad (2.2.14)$$

где $K = \text{const.}$ Для простоты будем полагать, что $K = 1$.

Предположим, что сигнал подвергнут функциональному преобразованию (2.2.13) на передающей стороне. После квантования преобразованного сигнала появляется погрешность Δx . На приемную сторону поступает сигнал $Z = y + \Delta x$ (полагаем, что шумы в канале отсутствуют). Последующее нелинейное преобразование (2.2.14) дает

$$x^* = \varphi(z) = \varphi(y + \Delta x). \quad (2.2.15)$$

Разность

$$x^* - x = \varepsilon \quad (2.2.16)$$

определяет ошибку между исходным и восстановленным сигналами.

Для нахождения оптимального закона преобразования разложим

$x^* = \varphi(y + \Delta x)$ в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} x^* = \varphi(y + \Delta x) &= \varphi(y) + \Delta x \varphi'(y) + ((\Delta x)^2 / 2) \varphi''(y) + \dots \\ &\dots + ((\Delta x)^n / n!) \varphi^n(y) \end{aligned} \quad (2.2.17)$$

При достаточно большом n , когда $(\overline{\Delta x})^2$ мала, согласно [137],

$$\sqrt{(\overline{\Delta x})^2} \ll \left[(2d\varphi(y)/dy) / (d^2\varphi(y)/dy^2) \right],$$

и можно ограничиться линейной частью ряда (2.2.17). Тогда для x^* получим:

$$x^* = \varphi(y) + \Delta x \varphi'(y). \quad (2.2.18)$$

Учитывая (2.2.14), после дифференцирования будем иметь

$$\varphi'(y) = dx/dy. \quad (2.2.19)$$

Подставляя (2.2.19) и (2.2.18) в (2.2.16), имеем:

$$\varepsilon = x^* - x = \varphi(y) + \Delta x (dx/dy) - \varphi(y) = \Delta x (dx/dy); \quad (2.2.20)$$

здесь dx/dy производная обратной функции компрессии.

Как видно из (2.2.20) при отсутствии нелинейного преобразования, когда $dx/dy = 1$, $\varepsilon = \Delta x$ и погрешность определяется шумом квантования. При надлежащем выборе $y = f(x)$ можно уменьшить погрешность восстановления ε .

Для θ -й степени модуля ошибки можно записать:

$$M[|\varepsilon|^\theta] = M[|\Delta x|^\theta] (dx/dy)^\theta;$$

здесь M - знак математического ожидания.

После усреднения по закону распределения получим:

$$M[|\bar{\varepsilon}|^\theta] = M[|\Delta x|^\theta] \int_{-1}^{+1} (W(x) / (dy/dx)^\theta) dx, \quad (2.2.22)$$

где dy/dx - производная закона компрессии.

Для оптимальной $y = f(x)$, обеспечивающей минимум выражений (2.2.11), воспользуемся методами вариационного исчисления [138]. после решения уравнения Эйлера для оптимальной амплитудной характеристики получим:

$$y = f(x) = \int_0^x [W(z)]^{1/(\theta+1)} dz \bigg/ \int_0^1 [W(z)]^{1/(\theta+1)} dz \quad (2.2.23)$$

При отсутствии нелинейного преобразования для $M[|\bar{\varepsilon}|^\theta]$ из (2.2.21) имеем:

$$M[|\varepsilon|^\theta] = M[|\Delta x|^\theta]. \quad (2.2.24)$$

Для выигрыша за счет введения нелинейного преобразования на основе (2.2.21) и (2.2.24) получим:

$$\varphi_\theta = 1 / \int_{-1}^1 (W(x) / (dy/dx)^\theta) dx \quad (2.2.25)$$

С учетом (2.2.23)

$$\varphi_\theta = 1 / \left[\int_{-1}^1 [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right]^{\theta+1} \quad (2.2.26)$$

При $\theta = 2$ уравнения (2.2.22) и (2.2.23) переходят в хорошо известные выражения для мощности шума квантования и закона компрессии [68].

Выражение (2.2.23) для $\theta = 2$ дает

$$y = \int_0^x \sqrt[3]{W(z)} dz \bigg/ \int_0^1 \sqrt[3]{W(z)} dz \quad (2.2.27)$$

В случае $\theta = 1$

$$y = \int_0^x \sqrt{W(z)} dz \quad / \quad \int_0^1 \sqrt{W(z)} dz \quad (2.2.28)$$

Выражение (2.2.28) представляет собой закон нелинейного преобразования сигналов, обеспечивающий минимум среднего модуля ошибки [139], т.е. $\Pi(x, x^*) = |x^* - x|$.

Когда $\theta \Rightarrow 0$, то φ_θ в (2.2.25) стремится к 1, а для нелинейного преобразования

$$y = \int_0^x W(z) dz \quad / \quad \int_0^1 W(z) dz \quad (2.2.29)$$

Такое преобразование обеспечивает одинаковую вероятность попадания значений сигнала в любой шаг квантования и поэтому дает максимум энтропии в квантованном сигнале.

Как уже отмечалось выше, процесс неравномерного квантования выгодно применять с точки зрения уменьшения числа уровней квантования, что, в свою очередь, дает возможность уменьшения количества кодовых импульсов в системах цифровой передачи, обработки или хранения ТВ информации.

Из результатов Шеннона [97] известно, что предельные возможности методов экономного представления кодированных сигналов определяются энтропией на выходе квантователя.

Среднее число двоичных единиц, требуемых для передачи одного отсчета, в идеальном случае может приблизиться к энтропии сигнала сколь угодно близко. С этой целью представляет интерес определение параметров скалярного квантователя, который, обеспечивая минимальную погрешность представления по заданному критерию восстановления, был бы оптимальным в смысле экономного представления передаваемого сигнала. Очевидно, что такая задача сводится к минимизации энтропии сигнала.

Таким образом, в смысле экономного представления сигналов, наилучшим является квантователь, обеспечивающий наименьшую энтропию. Для энтропии квантованного сигнала имеем:

$$H = - \sum_{k=1}^N P_k \lg P_k, \quad (2.2.30)$$

где $P_k = \int_{x_k}^{x_{k+1}} W(x) dx$ - вероятность попадания значений сигнала в

k -й квант.

Рассмотрим функцию потерь общего вида

$$R_\theta = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} |y_k - x|^\theta W(x) dx. \quad (2.2.31)$$

Требуется найти такой квантователь, для которого при $R_\theta \leq \varepsilon$ (ε - малое положительное число) выражение (2.2.30) было бы минимальным. Так как аналитическое решение (2.2.31) не представляется возможным для произвольного $W(x)$, в некоторых случаях удастся получить асимптотическое решение при $\varepsilon \Rightarrow 0$. Как показано в [140], асимптотически оптимальным при $\varepsilon \Rightarrow 0$ в смысле минимума энтропии является квантование, близкое к равномерному; при этом рассматриваются квантователи, у которых наибольший и наименьший шаг - бесконечно малые одного порядка. В работе [136] показано, что для энтропии любого квантователя, обеспечивающего точность ε , имеет место неравенство

$$H \geq (1/\theta) \ln (1 / [2^\theta (\theta + 1) \varepsilon]) + h(x) \approx H_{\text{рав}}, \quad (2.2.32)$$

где $h(x)$ - дифференциальная энтропия квантуемого сигнала; $H_{\text{рав}}$ - энтропия при равномерном квантовании.

Выражение (2.2.32) дает право утверждать, что для осуществления экономного представления сигналов нужно применять равномерное квантование с последующим статистическим кодированием или же осуществлять нелинейное квантование с последующим равномерным

кодированием.

Как с теоретической, так и с практической точки зрения, важно провести сравнительный анализ скалярного и векторного квантователей и оценить выигрыш, при переходе от скалярного квантования к векторному.

Как было уже отмечено, основные рабочие характеристики ВК полностью определяются средним искажением

$$\begin{aligned} D &= (1/k) M \{d(X - Y)\} = (1/k) M \|X - Q(X)\| = \\ &= (1/k) \sum_{i=1}^N \int_{x \in S_i} \|x - Y_i\|^2 P(x) dx \end{aligned} \quad (2.2.33)$$

и скоростью R

$$(1/k) H(Y) \leq R \leq (1/k) \log_2 N. \quad (2.2.34)$$

Построение ВК при заданной мере искажений и плотности вероятностей $P(X)$, требует выбора деления S_i и выходных векторов Y_i , $i=1, 2, \dots, N$. В скалярном случае ($k=1$), проблема более легкая, поскольку требуется деление одномерного "пространства" т.е. линии на неперекрывающиеся интервалы. Для $k > 1$, ячейка S_i может иметь любую форму и существует бесконечное число возможностей для множества делений. Даже, когда k -мерное ВК является равномерной, т.е. когда все S_i имеют одинаковые формы, имеется множество вариантов заполнения пространства R^k [120]. Возможность деления пространства R^k ячейками различной формы, значительно усложняет задачу оптимального ВК, но с другой стороны, дает возможность увеличить выигрыш за счет перехода от скалярного квантования к векторному. Для получения оптимальных рабочих характеристик k -мерного ВК можно выбрать один из двух подходов. Задать допустимое искажение D и найти ВК с минимальной скоростью R , или, зафиксировать максимальную скорость R и найти ВК с минимальным искажением D . Функций скорость-погрешность $R(D)$ и погрешность-скорость $D(R)$ по-

казывают, что когда длина блока, вектора \mathbf{X} , увеличивается тогда характеристики ВК приближаются к оптимально возможным характеристикам.

Рассмотрим k -мерный ВК с выходной скоростью

$$(1/k)H(\mathbf{Y}) = (-1/k) \sum_{i=1}^N P(\mathbf{Y}=\mathbf{Y}_i) \log_2 P(\mathbf{Y}=\mathbf{Y}_i), \quad (2.2.35)$$

поскольку $P(\mathbf{Y}=\mathbf{Y}_i) = \int_{S_i} f(\mathbf{X}) d\mathbf{X},$

$$(1/k)H(\mathbf{Y}) = -(1/k) \sum_{i=1}^N \int_{S_i} f(\mathbf{X}) \log P(\mathbf{Y}=\mathbf{Y}_i) d\mathbf{X}, \quad (2.2.36)$$

для малых искажений и достаточно гладкой функции плотности вероятности $f(\mathbf{X})$, можно записать, что

$$P(\mathbf{Y}=\mathbf{Y}_i) = \int_{S_i} f(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \approx V_i f(\mathbf{X}), \quad (2.2.37)$$

где V_i - объем i -го разделения. С учетом (2.2.37) (2.2.36) примет вид

$$\begin{aligned} (1/k)H(\mathbf{Y}) &\approx -(1/k) \sum_{i=1}^N \int_{S_i} f(\mathbf{X}) \log [V_i f(\mathbf{X})] d\mathbf{X} = \\ &= (1/k) H(\mathbf{X}) - (1/k) \sum_{i=1}^N \int_{S_i} f(\mathbf{X}) \log V_i d\mathbf{X} = \\ &= (1/k) H(\mathbf{X}) - (1/k) \sum_{i=1}^N P(\mathbf{Y}=\mathbf{Y}_i) \log V_i. \end{aligned} \quad (2.2.38)$$

Если все ячейки разделения имеют одинаковую форму и объем и, кроме этого, каждое разделение вводит одинаковую погрешность D , тогда для $V_i=V$

$$(1/k) H(\mathbf{Y}) \approx (1/k) H(\mathbf{X}) - (1/k) \log V \quad (2.2.39)$$

представляет собой скорость бит на отсчет, которая требуется для ВК со средней погрешностью равной D или меньше чем D .

Для функции скорость-погрешность имеем

$$R(D) = \inf_{f(y|x)} I(X;Y) \quad (2.2.40)$$

где нижняя грань ищется для всех возможных плотностей вероятностей перехода $f(y|x)$, которые обеспечивают среднюю погрешность D . Используя свойства взаимного количества информации можно записать, что

$$I(x,y) = H(x) - H(x|y),$$

$$H(x-y|y) = H(x|y) \text{ и } H(x-y) \geq H(x-y|y),$$

тогда для (2.2.40) получим следующее

$$\begin{aligned} R(D) &= \inf_{f(y|x)} [H(x) - H(x|y)] = H(x) - \sup_{f(y|x)} H(x-y|y) \geq \\ &\geq H(X) - \sup_{f(y|x)} H(X-Y) \triangleq R_{\text{ш}}(D) \end{aligned} \quad (2.2.41)$$

здесь учитывается, что $H(x)$ не зависит от $f(y|x)$, $R_{\text{ш}}(D)$ представляет собой нижнюю границу Шеннона функции скорость-погрешность [119]. Нижняя граница Шеннона $R_{\text{ш}}(D)$ позволяет обойти трудности вычисления $R(D)$ для общего случая, тогда как вычисление $R_{\text{ш}}(D)$ осуществляется проще.

Для оценки близости равномерного ВК к $R(D)$ сравним (2.2.39) и (2.2.41). Заметим, что если отсчеты выхода источника независимы и одинаково распределены, тогда $H(X) = KH(x)$, и первые члены в (2.2.39) и (2.2.41) будут идентичны. Можно показать, что для больших значений K $H(X-Y) = \log V$ с большой вероятностью [141] и поскольку $H(x-y) = (1/N) H(X-Y)$, то последние члены в (2.2.39) и (2.2.41) также равны для больших размерностей K .

Таким образом, можно заключить, что рабочие характеристики равномерного ВК достигают нижней границы Шеннона когда размерность асимптотически увеличивается. Такой результат поощряется, поскольку устанавливает, что равномерное ВК является асимптотически оптимальным. Для сравнения рабочих характеристик при небольших размерностях K , следует сравнить между собой $\sup_{f(y|x)} H(x-y)$ и $(1/K)\log V$,

где V - k -мерный объем ячейки разделения S_i . До вычисления V задаем такую ячейку S , которая обеспечивает допустимую среднюю погрешность D_d . Из выражения (2.2.37) следует, что вероятность любого k -го вектора X постоянна на область S , и если выходной вектор ВК представляет центроиду S , тогда ошибка квантования, распределена также неравномерно на S . С учетом этого, можно показать, что для допустимой средней погрешности D_d равномерная область квантования S , в одномерном случае (скалярное квантование), представляет собой замкнутый интервал $[-\sqrt{3D_d}, \sqrt{3D_d}]$, и следовательно [141].

$$(1/k) \log V = (1/2) \log 12 D_d = 1,792 + (1/2) \log D_d \text{ бит/отсчет} \quad (2.2.42)$$

Аналогично, для двумерного случая, в качестве S выберем шестиугольник, тогда для средней погрешности D_d , при шестиугольнике с радиусом равным $\sqrt{24D_d/5}$ [141], имеем

$$(1/k) \log v = (1/2) \log [72 \sqrt{3} D_d / 10] = 1,82 + (1/2) \log D_d \text{ бит/отсчет} \quad (2.2.43)$$

Значения (2.2.42) и (2.2.43) следует сравнить с верхней гранью энтропии разности, $\sup_{f(y|x)} H(x-y)$, для среднеквадратической меры погрешности [119].

$$\begin{aligned} \sup_{f(y|x)} H(x-y) &= (1/2) \log_2 \pi e D_d = \\ &= 2,047 + (1/2) \log D_d \text{ бит/отсчет} \end{aligned} \quad (2.2.44)$$

Если вычесть (2.2.42) из (2.2.44) получим, что переход равномерного скалярного квантования к векторному обеспечивает выигрыш 0,255 бит/отсчет. Сравнение (2.2.43) и (2.2.44) показывает, что двумерное ВК с шестиугольными ячейками обеспечивает выигрыш 0,028 бит/отсчет, по сравнению с одномерным (скалярным) квантованием.

Полученный теоретический результат не отражает тот выигрыш,

который получаем практически при переходе от скалярного квантования к векторному. Этот факт можно объяснить тем, что при расчетах не учитываются факторы субъективного улучшения качества квантованных изображений и корреляция исходных ТВ изображений. Эти факторы в большинстве случаев несколько значительны, что выигрыш во многом превосходит то значение которое получается при теоретических оценках. Эти утверждения будут доказаны в дальнейших результатах, полученных в диссертационной работе.

2.3. Оценка выигрышей в отношении сигнал-шум квантования при неравномерном квантовании

Как следует из предыдущего параграфа, для расчета нелинейных характеристик преобразования сигналов требуется знание одномерной плотности вероятности последних. С целью сравнения результатов нелинейного преобразования для различных законов распределения вероятностей исходных сигналов выберем нормальное распределение и распределение Лапласа поскольку этими распределениями чаще всего аппроксимируются сигналы изображения [40].

Учитывая широкое распространение среднеквадратической меры ошибок квантования и то, что при цифровом кодировании ТВ сигналов одним из важных параметров является мощность шумов квантования и отношение сигнал-шум квантования, расчет характеристик нелинейных преобразователей начнем со случая, когда результат преобразования оценивается на основе квадратичной функции потерь.

Мощность шума равномерного квантования, как известно [65], можно представить следующим образом:

$$\bar{\varepsilon}_p^2 = \Delta x^2 / 12.$$

Если возможные значения сигнала находятся в интервале

$[-x_{\max}, x_{\max}]$, последнее выражение можно преобразовать к виду

$$\varepsilon_p^2 = \Delta x^2 / 12 = (1/12) (2x_{\max} / N)^2 = x_{\max}^2 / 3N^2, \quad (2.3.1)$$

здесь N - число уровней квантования.

После подстановки (2.3.1) и (2.2.22) при $\theta = 2$ для мощности шумов неравномерного квантования получим:

$$\varepsilon_{\text{нер}}^2 = (2x_{\max}^2 / 3N^2) \int_0^x (W(x) / (dy/dx)^2) dx \quad (2.3.2)$$

На основе выражения (2.3.2) можно оценить шумы неравномерного квантования для заданного $W(x)$ и dy/dx - производной закона нелинейного преобразования.

Оптимальный закон нелинейного преобразования при $\theta = 2$ в выражении (2.2.23) для сигнала с нормальной функцией распределения вероятностей,

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (2.3.3)$$

будем иметь вид [6]:

$$y = x_{\max} \frac{\int_0^x (e^{-z^2/2\sigma^2})^{1/3} dz}{\int_0^{x_{\max}} (e^{-z^2/2\sigma^2})^{1/3} dz} = (x_{\max} \Phi(x/\sqrt{3}\sigma)) / \Phi(x_{\max}/\sqrt{3}\sigma), \quad (2.3.4)$$

где $\Phi(z) = 1/\sqrt{2\pi} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$ - интеграл вероятности.

Выражение (2.3.4) описывает оптимальное нелинейное преобразование для (2.3.3) по критерию минимума средней мощности шума квантования.

Минимальная мощность шума квантования с учетом (2.3.4) и (3.2) запишется следующим образом:

$$\varepsilon_H^2 = \left[(\sqrt{3})^3 \sigma^2 \pi / 6N^2 \right] / \left[\Phi^3(H/\sqrt{3}) \right], \quad (2.3.5)$$

здесь $H = x_{\max} / \sigma$ - пик-фактор сигнала.

Выражение (2.3.5) позволяет вычислить отношение сигнал-шум

квантования в зависимости от пик-фактора сигнала.

Для отношения средней мощности сигнала к мощности шума квантования будем иметь:

$$\gamma = \sigma^2 \varepsilon_H^2 = 6N^2 / \left[(\sqrt{3})^3 \pi \Phi (H / \sqrt{3}) \right]. \quad (2.3.6)$$

Для k -го шага квантования, согласно [89], имеем общее выражение:

$$\Delta_k \approx (2x_{\max} / N) (dx/du)_{x=x_k} \quad (2.3.7)$$

с учетом (2.3.4) и (2.3.7) для шага неравномерного квантования получим:

$$\Delta_k \approx (2\Phi (H / \sqrt{3})) / (N \exp (-x_k^2 / \sigma^2)). \quad (2.3.8)$$

На рис.2.3.1а показана зависимость $\gamma = f(H)$, рассчитанная по выражению (2.3.6) для числа уровней квантования $N = 8, 16, 32$. Там же показаны зависимости $\gamma_p = f(H)$ в отсутствие нелинейного преобразования, построенные на основе выражения

$$\gamma_p = 3N^2 / H^2. \quad (2.3.9)$$

Анализ приведенных кривых показывает, что выигрыш в отношении сигнал-шум квантования по сравнению с равномерным квантованием зависит от пик-фактора. В случае известного пик-фактора кривые позволяют оценить эффективность нелинейного преобразования для сигналов с нормальным распределением. Например, в соответствии с [142], пик-фактор ТВ сигнала меняется в пределах 4...6. Для отмеченных величин пик-факторов выигрыш в отношении сигнал-шум квантования по сравнению с равномерным квантованием составляет 2,6...6 дБ.

В связи с тем, что автокорреляционная функция телевизионного сигнала имеет экспоненциальный вид [51,52], весьма эффективными в системах цифрового кодирования сигналов являются различные методы линейного предсказания. В частности, широкое распространение получила дифференциальная импульсно-кодовая модуляция. Поэтому, пред-

ставляет существенный интерес оценка величины выигрыша в отношении сигнал-шум квантования, полученного при нелинейных преобразованиях разностного сигнала.

Примем, что разностный сигнал, в соответствии с [45,46], подчиняется распределению Лапласа:

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma} e^{-\sqrt{2} \frac{|x|}{\sigma}} \quad (2.3.10)$$

Тогда на основе (2.2.27) и (2.3.2) для закона нелинейного преобразования, мощности шума квантования и отношения сигнал-шум квантования получим следующие выражения:

$$y = x_{\max} \frac{1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{3} \frac{|x|}{\sigma}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{3} N\right)}, \quad (2.3.11)$$

$$\bar{\varepsilon}_n^2 = \frac{9\sigma^2}{2N^2} \left(1 - e^{-\frac{\sqrt{2}}{3} N}\right)^3, \quad (2.3.12)$$

$$\gamma = \frac{2N^2}{9 \left(1 - e^{-\frac{\sqrt{2}}{3} N}\right)^3}. \quad (2.3.13)$$

Шаг квантования при этом равен

$$\Delta_k \approx \frac{6\sigma \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{3} N\right)\right]}{\sqrt{2} N \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{3\sigma} x_k\right)}. \quad (2.3.14)$$

На рис.2.3.1б представлена зависимость $\gamma = f(N)$, построенная в соответствии с (2.3.13). Выигрыш по сравнению с равномерным квантованием и в этом случае зависит от пик-фактора. Для пик-фактора $N = 4 \dots 6$ выигрыш составляет 3,2...5,2 дб. Однако значения пик-фактора 4...6 характерны для обычного ТВ сигнала, тогда как пик-фактор разностного сигнала может отличаться от пик-фактора исходного видеосигнала.

Для нахождения пик-фактора разностного сигнала воспользуемся

выражением для энергетического спектра ТВ сигнала.

В соответствии с [58] это выражение имеет вид

$$\left. \begin{aligned} G(\omega) &= \frac{\omega_c^2}{\omega_c^2 + \omega^2}, \text{ для } -\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0; \\ G(\omega) &= 0, \text{ для других } \omega, \end{aligned} \right\} \quad (2.3.15)$$

где ω_0 - верхняя граничная частота в спектре видеосигнала.

По данным [58] значение $\omega_0 / 2\pi\omega_c$ меняется в пределах 10...30 в зависимости от характера изображения.

С помощью преобразования Винера-Хинчина (2.3.15) находим корреляционную функцию сигнала:

$$K(\tau) = \frac{\omega_c}{4} e^{-\omega_c |\tau|}. \quad (2.3.16)$$

Энергетический спектр разностного сигнала находим в соответствии с [143]. После преобразования будем иметь:

$$G_1(\omega) = 4 \sin^2 \frac{\omega T}{2} \frac{\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}, \quad (2.3.17)$$

где T - время задержки.

Для дисперсии исходного сигнала из (2.3.16) получаем

$$\sigma^2 = K(0) = \frac{\omega_c}{4}. \quad (2.3.18)$$

Для дисперсии разностного сигнала имеем:

$$\sigma_1^2 = \frac{\omega_c}{2} (1 - e^{-\omega_c |\tau|}). \quad (2.3.19)$$

Отношение дисперсии исходного сигнала к разностному дает значение относительного уменьшения дисперсии сигнала, т.е.

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} = \frac{125,6}{12,26} = 10,2 \quad \text{для} \quad \frac{\omega_0}{2\pi\omega_c} = 10.$$

Отношение эффективных значений σ и σ_1

$$\sigma / \sigma_1 = 3,19.$$

В случае $\omega_0 / 2\pi\omega_c = 20$ для отношения эффективных значений

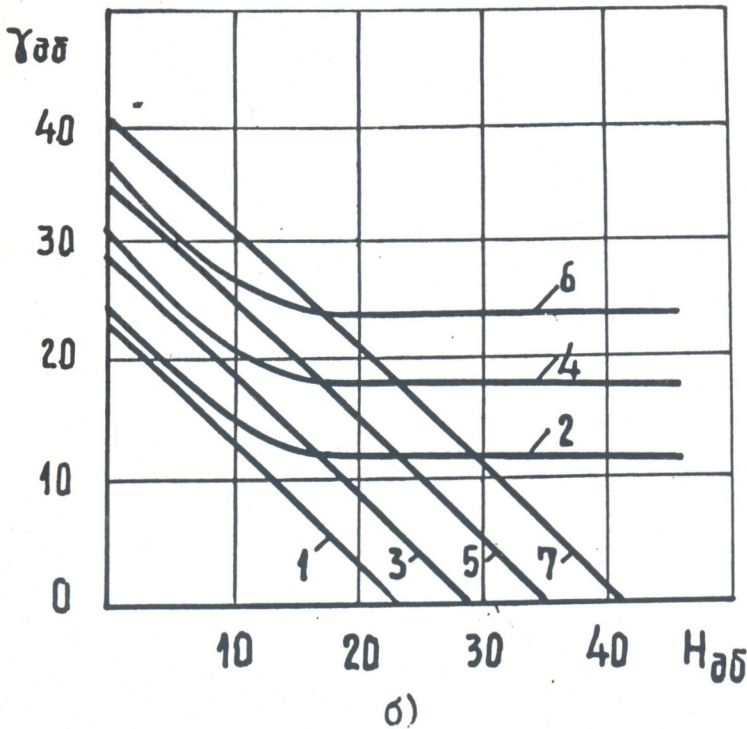
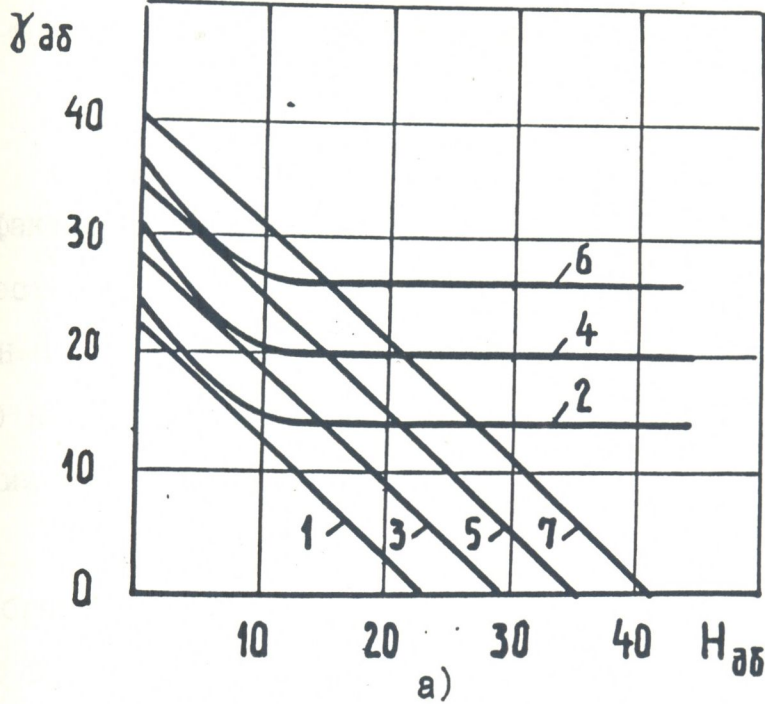


Рис.2.3.1 Зависимости отношения сигнал-шум квантования от величины пик-фактора ТВ сигналов для:
а - плотности вероятности Гаусса, б - плотности вероятности Лапласа; кривая 1 - $N = 8$; 3 - $N = 16$; 5 - $N = 32$; 7 - $N = 64$ (для равномерной плотности вероятности); 2 - $N = 8$; 4 - $N = 16$; 6 - $N = 32$ (для неравномерной плотности вероятности).

будем иметь $\sigma / \sigma_1 = 4,53$.

Для пик-фактора разностного сигнала можно записать:

$$H_1 = H \frac{\sigma}{\sigma_1}, \quad (2.3.20)$$

где H - пик-фактор исходного сигнала.

Если учесть, что пик-фактор для ТВ сигнала меняется в пределах $4 \dots 6$ $H=5$ и $\omega_0 / 2\pi\omega_c = 10$, получим: $H_1 = 5 \cdot 3,19 = 15,92$ или (в децибелах) $H=24$ дБ, тогда как для исходного сигнала $H=13,98$ дБ; при отношении $\omega_0 / 2\pi\omega_c = 20$ пик-фактор предсказанного сигнала $H_1 = 21,1$ дБ.

Таким образом, величина пик-фактора предсказанного сигнала возрастает по сравнению с исходной, что, как видно из рис.2.3.1б, повышает выигрыш в отношении сигнал-шум квантования.

Представляет интерес и критерий, который обеспечивает получение максимума энтропии в квантованном сигнале. Последнее требует выравнивания вероятностей появления значений сигнала в любом шаге квантования. Такое нелинейное преобразование можно получить из уравнения (2.2.23) при $\theta \Rightarrow 0$. В этом случае для нелинейного преобразования имеем:

$$y = x_{\max} \frac{\int_0^x W(z) dz}{\int_0^{x_{\max}} W(z) dz}. \quad (2.3.21)$$

С учетом (2.3.3) выражение нелинейного преобразования для нормального закона распределения примет вид

$$y = 2x_{\max} \Phi(x/\sigma); \quad (2.3.22)$$

здесь $\Phi(z)$ - интеграл вероятностей.

Для мощности шума квантования на основе (2.3.2) получим:

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{6N^2} \int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{W(x)}. \quad (2.3.23)$$

Для вычисления мощности шума квантования сигнала с нормальным распределением вероятностей имеем:

$$\varepsilon_H^2 = \frac{\sqrt{\pi} \sigma^2}{3N^2} \int_0^{H/\sqrt{2}} e^{t^2} dt. \quad (2.3.24)$$

Отношение сигнал-шум квантования вычисляется следующим образом:

$$\gamma = 3N^2 / \sqrt{\pi} \int_0^{H/\sqrt{2}} e^{t^2} dt. \quad (2.3.25)$$

Шаг квантования с учетом (2.3.7) запишется в виде

$$\Delta_k \approx \frac{1}{NW(x_k)} = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma \exp\left(-\frac{x_k^2}{2\sigma^2}\right)}{N}. \quad (2.3.26)$$

Расчеты на ЭВМ показали, что в этом случае выигрыш в отношении сигнал-шум квантования отсутствует по сравнению с равномерным квантованием.

Как уже отмечалось, большой интерес представляет оценка выигрыша, полученного при переходе от равномерного квантования к неравномерному, для предсказанного сигнала в системе ДИКМ. В этом случае для закона нелинейного преобразования, мощности шума квантования и отношения сигнал-шум квантования будем иметь следующие выражения:

$$y = x_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{\sigma} |x|\right) \right]; \quad (2.3.27)$$

$$\varepsilon_L^2 = \frac{\sigma^2}{6N^2} (e^{\sqrt{2}H} - 1); \quad (2.3.28)$$

$$\gamma = 6N^2 / (e^{\sqrt{2}H} - 1). \quad (2.3.29)$$

В соответствии с (2.3.29) были построены зависимости $\gamma=f(H)$ для различного числа уровней квантования N [8,17]. Анализы расчетов показали [8], что, как и в предыдущем случае, преобразование

(2.3.27) не является эффективным в смысле улучшения отношения сигнал-шум квантования.

Рассмотрим нелинейное преобразование на основе (2.2.23) при $\theta = 2$ и $\theta \Rightarrow 0$ для равномерного закона распределения вероятностей.

Предположим, что сигнал имеет распределение

$$W(x) = \begin{cases} \frac{1}{2x_{\max}} & -x_{\max} \leq x \leq x_{\max}; \\ 0 & x < -x_{\max}, \quad x > x_{\max}. \end{cases} \quad (2.3.30)$$

Выражение (2.2.23 с учетом (2.3.30) дает

$$y = \frac{x_{\max} \int_0^x \left(\frac{1}{2x_{\max}}\right)^{1/3} dx}{\int_0^{x_{\max}} \left(\frac{1}{2x_{\max}}\right)^{1/3} dx} = x \quad (2.3.31)$$

что соответствует отсутствию нелинейного преобразования.

В случае $\theta = 0$ из (2.2.23) получаем:

$$y = \frac{x_{\max} \int_0^x \frac{1}{2x_{\max}} dx}{\int_0^{x_{\max}} \frac{1}{2x_{\max}} dx} = x \quad (2.3.32)$$

Таким образом, нелинейное преобразование по критерию минимума средней мощности шума квантования и по информационному критерию совпадает только в том случае, когда исходное распределение сигнала является равномерным. Во всех остальных случаях они дают различные законы нелинейного преобразования, которые, в свою очередь, определяют отношение сигнал-шум квантования. Нетрудно убедиться, что все сказанное будет справедливым для любого значения θ в выражении (2.2.23).

Приведенные выше рассуждения показывают, что оптимальным

квантованием при любом θ для равномерного закона является равномерное квантование (т.е. отсутствие нелинейного преобразования).

Таким образом, закон нелинейного преобразования (2.3.1) при $\theta = 2$ обеспечивает минимальную среднюю мощность шума квантования, а при $\theta = 0$ максимальную информативность в квантованном сигнале. С теоретической точки зрения представляет интерес нахождение нелинейного преобразования, которое обладало бы достоинствами обоих преобразований. Очевидно, что такой закон нелинейного преобразования должен находиться между законами $\theta = 0$ и $\theta = 2$ для (2.2.23), т.е. при $\theta = 1$. Для закона нелинейного преобразования в этом случае получим:

$$y = \frac{x_{\max} \int_0^x \sqrt{W(z)} dz}{\int_0^{x_{\max}} \sqrt{W(z)} dz} \cdot (2.3.33)$$

Преобразование (2.3.33), в соответствии с [139], обеспечивает минимум среднего значения модуля ошибки и выигрыш в информационном содержании.

Оценим для закона нелинейного преобразования (2.3.33) выигрыш в отношении сигнал-шум квантования. Как и прежде, расчеты будем проводить для сигналов с различными распределениями вероятностей их значений.

Нелинейное преобразование для нормального распределения на основе (2.3.33) имеет вид

$$y = (x_{\max} \Phi(x / \sqrt{2}\sigma)) / \Phi(H / \sqrt{2}) \cdot (2.3.34)$$

Для мощности шума квантования и отношения сигнал-шум квантования соответственно будем иметь:

$$\varepsilon_H^2 = (\sqrt{2\pi}\sigma / 3N^2) \Phi^2 (H / \sqrt{2}) , \quad (2.3.35)$$

$$\gamma = \frac{3N^2\sigma}{\sqrt{2\pi} \Phi^2 (H / \sqrt{2})} . \quad (2.3.36)$$

Анализ расчетов [19,23,29,30] показывает, что выигрыш в отношении сигнал-шум квантования меняется в зависимости от пик-фактора. При характерных для ТВ сигнала пик-факторах ($H=4\dots 6$) выигрыш составляет 3...4 дБ при переходе от равномерного квантования к неравномерному.

Когда распределение значений сигнала подчиняется распределению Лапласа, получаем следующие соотношения:

$$y = \frac{x_{\max} \left[1 - \exp \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{|x|}{\sigma} \right) \right]}{\left[1 - \exp \left(-\frac{H}{\sqrt{2}} \right) \right]} ; \quad (2.3.37)$$

$$\varepsilon_N^2 = \frac{\sqrt{8}\sigma}{3N^2} (1 - e^{-H/\sqrt{2}})^2 ; \quad (2.3.38)$$

$$\gamma = 3N^2\sigma / \sqrt{8} (1 - e^{-H/\sqrt{2}})^2 . \quad (2.3.39)$$

Как известно [65,60], аналитические решения уравнений квантования (2.2.4) и (2.2.5) невозможно, кроме тривиальных случаев (когда плотность вероятности $W(x) = \text{const}$). Однако численные расчеты показали [18], что итеративный процесс нахождения порогов и уровней квантования (на основании (2.2.4) и (2.2.5)) на сходится, если первое приближение y'_1 к истинному значению уровня y_1 выбрано неправильно.

Автором предложена [19] методика расчета шкал квантования с использованием функции компрессии (2.2.13).

При квантовании сигналов на достаточно большое число уровней (обычно при $N \geq 8$) расчет производится с одновременным

использованием уравнений (2.2.4), (2.2.5) и (2.2.13).

Предложенная методика расчета заключается в следующем. Из уравнения компрессии $y = f(x)$ (для заданного $W(x)$) находим обратную функцию экспандера $x = f^{-1}(y)$ и для равномерно расположенных уровней y_k (при заданном числе уровней квантования N) находим неравномерно расположенные пороги x_k . Затем с помощью x_k из уравнения (2.2.5) находятся неравномерные уровни y_k ; эти значения подставляются в (2.2.4) и находятся новые x_k . В последующем, используя (2.2.4) и (2.2.5), процесс продолжается до тех пор, пока найденные на n -й итерации значения x_k и y_k не будут отличаться от x_k и y_k , найденных на $n - 1$ -м этапе итерации на малую, наперед заданную величину. Как показали расчеты [19,22,29] при такой методике итеративный процесс быстро сходится и время вычисления 10-15 раз меньше, чем при случайном выборе начальных значений x_k и y_k .

При квантовании сигналов, кроме шумов квантования, возникают так называемые шумы перегрузки, что особенно характерно для систем кодирования на основе ДИКМ. Значение этих шумов возрастает с уменьшением пик-фактора, и максимальное значение шумов перегрузки имеет место при $N = 1$.

Оценим, при каких значениях N можно пренебречь шумами перегрузки по сравнению с шумами квантования. Для мощности шума перегрузки в соответствии с [89]

$$\Delta_{\Pi}^2 = 2 \int_{x_{\max}}^{\infty} (x - x_{\max}) W(x) dx. \quad (2.3.40)$$

В случае нормального распределения, после решения (2.3.40), получим:

$$\Delta_{\Pi}^2 = \sigma^2 \left\{ (1 - N^2) [1 - \Phi(N / \sqrt{2})] - (2N / \sqrt{2\pi}) e^{-N^2/2} \right\}. \quad (2.3.41)$$

Для отношения мощности сигнала к мощности шума перегрузки

будем иметь:

$$\gamma_{\pi} = (\sigma^2 / \Delta_{\pi}^2) = \frac{1}{\left\{ (1 + N^2) [1 - \Phi(N / \sqrt{2})] - (2N / \sqrt{2\pi}) e^{-N^2/2} \right\}}. \quad (2.3.42)$$

Выражение (2.3.42) позволяет найти отношение сигнал-шум при заданном пик-факторе.

Как уже отмечалось, пик-фактор видеосигнала меняется в пределах 4...6. Например, для $N = 5$ из (2.3.42) находим: $\gamma_{\pi} = 46$ дБ.

В случае закона Лапласа для мощности шума перегрузки имеем:

$$\Delta_{\pi}^2 = (2 / (\sqrt{2} \sigma)) \int_{x_{\max}}^{\infty} (x - x_{\max}) \exp \left\{ -\sqrt{2} |x| / \sigma \right\} dx = \sigma^2 e^{-\sqrt{2}N}. \quad (2.3.43)$$

Тогда для отношения сигнал-шум перегрузки получим:

$$\gamma_{\pi} = \sigma^2 / \Delta_{\pi}^2 = e^{\sqrt{2}N} \quad (2.3.44)$$

При $N = 5$ $\gamma_{\pi} = 30,4$ дБ.

Таким образом, шумы перегрузки для закона Лапласа оказались большими, чем в случае нормального распределения. Несмотря на это, при квантовании на малое число уровней ($N = 8,16$) шумами перегрузки можно пренебречь по сравнению с шумами квантования.

В раз.2.2 было отмечено, что функция потерь $\Pi(x, y)$ в общем случае может иметь несколько локальных минимумов. Условием совпадения локального минимума с глобальным при среднеквадратическом критерии является неравенство (2.2.10). Для сигнала с нормальным распределением вероятностей это условие запишется как

$$d^2 \ln W(x) / dx^2 = - (1 / \sigma^2) < 0, \quad (2.3.45)$$

т.е. условие (2.2.10) выполняется (так как σ^2 — положительная величина).

Для закона Лапласа условие (2.2.10) имеет вид

$$\frac{d^2 \ln W(x)}{dx^2} = \frac{[(1/\sqrt{2}\sigma) \exp(-\sqrt{2}(x/\sigma))]''}{(1/\sqrt{2}\sigma) \exp(-\sqrt{2}(x/\sigma))} = 0, \quad (2.3.46)$$

т.е. неравенство вырождается в равенство.

Для того чтобы показать единственность минимума, рассмотрим следующее свойство функции

$$W(x, \alpha) = e^{-|x|} [1 - \alpha e^{-(1-\alpha)/\alpha |x|}]. \quad (2.3.47)$$

В предельном случае, когда $\alpha \rightarrow 0$. $W(x, \alpha)$ равномерно приближается к лапласовскому распределению (без учета нормирующего множителя). Производная выражения (2.3.47)

$$(d/dx) \ln W(x, \alpha) = (d/dx) [-|x| + \ln(1 - \alpha e^{-(1-\alpha)/\alpha |x|})] =$$

$$= \operatorname{sgn} x \left[-1 + \frac{1 - \alpha e^{-(1-\alpha)/\alpha |x|}}{1 - \alpha e^{-(1-\alpha)/\alpha |x|}} \right]. \quad (2.3.48)$$

Для всех $\alpha < 1$ выражение (2.3.48) монотонно уменьшается, и в соответствии с (2.2.10) плотность вероятности (2.3.47) имеет единственный минимум, независимо от того, насколько мала α . Так как мощность шума является непрерывной функцией от α , такое же заключение можно сделать и для предельного случая [125].

2.4. Исследование робастности квантования

ТВ изображений

При исследовании вопросов оптимизации процесса квантования в качестве модели квантуемых ТВ сигналов был принят стационарный случайный процесс. В случае реальных ТВ сигналов их вероятностные характеристики, как известно [41, 45-47], меняются. Так, для одного и того же класса изображений при одинаковых распределениях вероятности могут изменяться и функции распределения вероятностей квантуемых сигналов. В связи с этим возникает задача оценки робастности квантования, под которой понимается относительная стабильность величины ошибки квантования при изменении вероятностных характеристик квантуемых сигналов.

Проблема робастности квантования была исследована в ряде работ [90-94, 144]. Например, в [144] решалась задача минимаксного квантования и было показано, что для ограниченных на некотором интервале распределений робастным является равномерный N - уровневый квантователь. В [91] задача минимаксного квантователя рассматривалась для класса распределений, состоящих из унимодальных распределений с ограниченными обобщенными моментами, и было получено, что робастным в этом случае является неравномерный квантователь.

В [91-93] исследованы вопросы асимптотически робастного квантования, когда число уровней квантования N становится бесконечно большим. В [91] в качестве класса распределений использовалась модель унимодальных распределений с ограниченными обобщенными моментами и найден вид минимаксного компрессора.

В [94] задача нахождения минимаксного компрессора решалась для класса ε - загрязненной гауссовской модели распределений [90].

$$f(x) = (1 - \varepsilon) f_1(x) + \varepsilon f_2(x),$$

где $f_1(x)$ - гауссовская функция распределения вероятностей; $f_2(x)$ - произвольная неизвестная функция распределения, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ - неизвестное число. Для такого класса распределений был найден вид компрессора.

Однако исследования робастности квантования применительно к ТВ сигналам, с учетом особенностей их статистических характеристик (по имеющимся отечественным и зарубежным литературным данным), не приводились. В связи с этим возникла необходимость исследования различных аспектов робастности квантования ТВ сигналов, оптимизированного по заданным критериям.

Следует отметить, что робастность квантования может быть достигнута адаптацией процесса квантования, т.е. путем изменения параметров квантования (с целью сохранения оптимальной величины ошибки квантования) при изменении вероятностных характеристик ТВ сигналов. Но применение адаптивных алгоритмов оправдано, когда исходные статистические данные очень грубы и сильно меняются за короткий промежуток времени. Адаптивные алгоритмы довольно сложны в реализации, и в тех случаях, когда неточность статистических данных невелика, использование фиксированных квантователей более выгодно. Как отмечалось, ошибка квантования и отношение сигнал-шум квантования зависят как от дисперсии квантуемых сигналов, так и от распределения вероятности ТВ сигналов.

Как указывалось, выше, при отклонении вероятностных характеристик сигналов от априори принятых, величина ошибки квантования отличается от оптимальной (т.е. минимально достижимой для заданной функции распределения квантуемых сигналов и заданного критерия оптимальности квантования). Задача робастного квантования в общем случае может быть сформулирована следующим образом. Рассмотрим функционалы

$$\left. \begin{aligned} R_n(W) &= \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} \Pi(x, y_k) W(x) dx, \\ R_{1n}(W) &= \min R_n(W), \end{aligned} \right\} \quad (2.4.1)$$

определенные на множестве неотрицательных измеримых функций [136], интеграл от которых равен 1 (условие нормировки плотности вероятности); $R_n(W)$ — представляет собой функционал, с помощью которого производится выбор $N - 1$ порогов $\{x_k\}$ и N уровней $\{y_k\}$ квантования; $R_{1n}(W)$ отображает минимальное значение средней функции потерь $\Pi(\overline{x}, y)$ при квантовании на N уровней.

Можно показать, что функционал $R_{1n}(W)$ является непрерывным, т.е. для любого $\varepsilon_1 > 0$ найдется такое $\varepsilon_2 > 0$, что если:

$$\int_{x_0}^{x_N} |W_1(x) - W_2(x)| dx < \varepsilon_2, \quad (2.4.2)$$

$$|R_{1n}(W_1) - R_{1n}(W_2)| < \varepsilon_1; \quad (2.4.3)$$

здесь ε_1 и ε_2 — любые произвольно малые положительные числа.

Если $M = \max \Pi(x, y)$ и полагая, что $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 / M$ для любого способа квантования на N уровней, будем иметь:

$$\begin{aligned} |R_n(W_1) - R_n(W_2)| &= \left| \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} \Pi(x, y_k) [W_1(x) - W_2(x)] dx \right| \leq \\ &\leq M \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} |W_1(x) - W_2(x)| dx = M \int_{x_0}^{x_N} |W_1(x) - W_2(x)| dx < \\ &< M (\varepsilon_1 / M) = \varepsilon_1. \end{aligned} \quad (2.4.4)$$

Заметим, что $R_{1n}(W_1)$ и $R_{1n}(W_2)$ соответствуют минимумам двух функций, которые ни в одной точке не различаются больше, чем на ε_1 . Таким образом, если совокупность $\{x_k\}$, $\{y_k\}$ обеспечивает минимум выражению (2.4.1) при некотором $W(x)$, то при незначительном изменении плотности вероятности квантование с параметрами $\{x_k\}$,

$\{y_k\}$ не вызывает большого увеличения погрешности квантования по сравнению с оптимальным квантованием. Аналогично можно показать, что при "незначительном" изменении функций $\Pi(x, y)$ квантователь остается близким к оптимальному.

Когда функция распределения вероятности квантуемых сигналов точно неизвестна, важно найти такое распределение, для которого ошибка квантования максимальна, а затем найти такую оптимальную стратегию квантования, при которой ошибка будет минимальной. С математической точки зрения эту задачу можно записать в виде

$$\min_{Q \in \alpha_N} \sup_{v \in P} \int |x - Q(x)|^2 W(x) dx, \quad (2.4.5)$$

где $Q(x) = y_k; x \in (x_k, x_{k+1})$; $k = 1, \dots, N$; α_N - класс N - уровней квантователей; P - класс функции распределения вероятности.

Робастное квантование можно сформулировать на языке теории игр с двумя игроками. Первый игрок - проектировщик квантователя - пытается минимизировать среднюю ошибку квантования, в то время как второй игрок - оппонент, старается максимизировать ошибку квантования, выбирая сигнал с наиболее неподходящим распределением вероятностей из допустимого класса распределений. Если существует минимаксное решение этого вопроса, можно считать, что игра имеет результат.

Для оценки робастности квантования ТВ сигналов на основе минимаксного критерия в качестве модели квантуемых сигналов примем сигналы, распределения вероятностей которых принадлежат ограниченному интегралу $[-a, a]$.

Как было показано в раз.2.2 (выражение 2.2.22), для θ - степени модуля средней ошибки квантования с учетом (2.2.23) можно записать:

$$M[|\bar{\varepsilon}|^\theta] = M[|\Delta x|^\theta] \left[\int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right]^{(\theta+1)}. \quad (2.4.6)$$

Найдем вид функции $W(x)$, при которой выражение (2.4.6) достигает своего минимаксного значения. Для этого рассмотрим интеграл

$$\left[\int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right]^{(\theta+1)}. \quad (2.4.7)$$

Отметим, что функция $W(x)$ должна удовлетворять условию нормировки:

$$\int_{-a}^a W(x) dx = 1.$$

Определим верхнюю грань выражения (2.4.7)

$$K = \sup_{W \in [-a, a]} \left[\int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right]^{(\theta+1)}. \quad (2.4.8)$$

Как известно [144], если $W(x)$ и $q(x)$ - любые две интегрируемые функции на сегменте $[-a, a]$, а p и q - любые два числа, превосходящие единицу и связанные соотношением $1/p + 1/q = 1$, то справедливо неравенство Гельдера для интегралов

$$\left| \int_{-a}^a W(x)q(x) dx \right| \leq \left(\int_{-a}^a |W(x)|^p dx \right)^{1/p} \left(\int_{-a}^a |q(x)|^q dx \right)^{1/q}. \quad (2.4.9)$$

Предположим, что в (2.4.9) $p = \theta + 1$, $q = (\theta + 1)/\theta$, $\theta > 0$ и $q(x) = 1$. Тогда неравенство (2.4.9) можно переписать следующим образом:

$$\left| \int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right| \leq \left(\int_{-a}^a [W(x)]^{(\theta+1)/\theta} dx \right)^{\theta/(\theta+1)} \left(\int_{-a}^a W(x) dx \right)^{1/(\theta+1)}. \quad (2.4.10)$$

Второй интеграл в правой части (с учетом условия нормировки) равен единице. Поэтому (2.4.10) примет вид

$$\int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \leq [2a]^{\theta/(\theta+1)}, \quad (2.4.11)$$

или, в случае равенства, с учетом (2.4.7):

$$\left(\int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right)^{(\theta+1)} = [2a]^\theta. \quad (2.4.12)$$

Определим вид функции $W(x)$, удовлетворяющей равенству (2.4.11). Предположим, что $W(x) = 1/2a$. Последнее удовлетворяет условию нормировки на сегменте $[-a, a]$:

$$\int_{-a}^a (1/2a) dx = 1. \quad (2.4.13)$$

Тогда после подстановки в (2.4.12) получаем:

$$\left(\int_{-a}^a [W(x)]^{1/(\theta+1)} dx \right)^{(\theta+1)} = \left(\int_{-a}^a [1/2a]^{1/(\theta+1)} dx \right)^{(\theta+1)} = (2a)^\theta. \quad (2.4.14)$$

Таким образом, получаем, что плотность вероятности, которая удовлетворяет условию (2.4.48), описывается функцией равномерного распределения. Для нахождения минимального значения (2.4.6) рассмотрим, например, случай $\theta = 2$, а для $W(x)$ выберем функцию, описывающую ограниченный нормальный закон

$$\left. \begin{aligned} W(x) &= \frac{\exp(-x^2/2\sigma^2)}{\sqrt{2\pi} \Phi(a/\sigma)} \quad \text{при } |x| < a, \\ W(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.4.15)$$

Тогда для мощности шума квантования с учетом (2.4.6) и (2.4.15) получаем:

$$\varepsilon_H^2 = \frac{C\sigma^2}{\Phi(x/\sigma)} \Phi^3\left(\frac{a}{\sqrt{3}\sigma}\right); \quad (2.4.16)$$

здесь $\Phi(z)$ - интеграл вероятности; C - некоторый коэффициент.

Из выражения (2.4.16) видно, что при $\sigma \Rightarrow 0$ ε_H^2 также стремится к нулю, но при $\sigma \Rightarrow 0$ распределение $W(x)$ из (2.4.15) стремится к

дельта-функции:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\exp(-\frac{x^2}{\sigma^2})}{(\sqrt{2\pi} \sigma) \Phi(a/\sigma)} = \delta(x) \quad (2.4.17)$$

Приведенный пример (2.4.15) не является единственной функцией, которая переходит в (2.4.17); можно найти множество функций, которые при предельном переходе обращаются в дельта-функцию [143].

Таким образом, функции плотности вероятности, значения которых приближаются к (2.4.17), будут иметь минимальную мощность шума квантования, а в пределе, когда $W(x)$ переходит в дельта-функцию, шум квантования становится равным нулю. Рассмотрим вид функции компрессии, когда $W(x) \Rightarrow \sigma(x)$. С учетом (2.3.1) и (2.4.15) при $\theta = 2$

$$y = \frac{a \Phi(x/\sqrt{3} \sigma)}{\Phi(a/\sqrt{3} \sigma)}; \quad (2.4.18)$$

здесь a - максимальное значение сигнала.

Как и в предыдущих случаях, устремим σ к нулю; тогда из (2.4.18) получим

$$y = a, \quad (2.4.19)$$

т.е. функция компрессии принимает вид ограничения на уровне a .

В заключение отметим, что, как уже было показано, когда плотность вероятности значений сигнала описывается равномерной функцией распределения, мощность шума квантования получается максимальной (2.4.12), а законом преобразования является линейная зависимость $y = x$. В случае же минимума мощности шума квантования плотность вероятности значений сигнала должна приближаться к дельта-функции, а законом преобразования является функция $y = a$ [28].

Анализируя сказанное, можно отметить, что все реальные процессы имеют плотности вероятностей, которые находятся между равномерной функцией распределения и плотностью вероятности, выраженной

через дельта-функцию. Соответствующие им функции преобразования будут находиться между функциями $y = x$ и $y = a$.

Таким образом, с точки зрения робастности квантования, когда распределение вероятности квантуемых сигналов точно не известно, а известен лишь диапазон изменения их возможных значений, робастным является равномерное квантование.

Следует отметить, что при кодировании ТВ сигналов часто квантователи оптимизируют по минимуму среднеквадратичной ошибки и о вероятностных характеристиках квантуемых сигналов имеются определенные априорные сведения. Например, при кодировании ТВ сигналов методом ДИКМ известно, что вероятности значений ошибки предсказания хорошо описываются функциями распределения Лапласа или Гаусса [45]. Поэтому представляет интерес оценка робастности квантования, оптимизированного по минимуму среднеквадратичной ошибки, при распределениях вероятностей Лапласа и Гаусса.

2.5 Оценка робастности среднеквадратически оптимальных квантователей ТВ изображений

Во многих практических случаях кодирования ТВ изображений ошибка квантования часто оценивается на основе среднеквадратического критерия. В связи с этим представляет интерес оценка робастности квантования в таких случаях.

Для среднеквадратической ошибки квантования имеем:

$$D = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x - y_k)^2 W(x) dx, \quad (2.5.1)$$

где x_k и y_k - соответственно пороги и уровни квантования;

$W(x)$ - плотность распределения вероятности квантуемых сигналов.

При квантовании ТВ сигналов, как уже было отмечено, точные вероятностные характеристики неизвестны, но часто при теоретических расчетах используются вероятностные модели ТВ сигналов в виде распределения Гаусса

$$W_1(x) = (1/\sqrt{2\pi} \sigma) \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (2.5.2)$$

или Лапласа

$$W_2(x) = (1/\sqrt{2} \sigma) \exp(-\sqrt{2}|x|/\sigma). \quad (2.5.3)$$

Минимум выражения (2.5.1) достигается при выборе x_k и y_k на основе системы уравнений [65]

$$y_k = 2 x_k - y_{k-1}, \quad (2.5.4)$$

$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} (x - y_k) W(x) dx = 0. \quad (2.5.5)$$

Анализ выражений (2.5.1), (2.5.4), (2.5.5) показывает, что пороги и уровни, а также ошибка квантования зависят от плотности вероятности квантуемых сигналов. Обычно расчет x_k и y_k производится при заданной плотности вероятности для нормированной дисперсии $\sigma^2 = 1$. Реальные квантуемые сигналы являются нестационарными по дисперсии и, очевидно, что их дисперсия может принимать значения, отличные от единицы. Тогда фактическая ошибка квантования будет отличаться от ошибки, вычисленной для заданной плотности вероятности $W(x)$ по формуле (2.5.1). В связи с этим, целесообразно произвести количественную оценку зависимости ошибки квантования от дисперсии квантуемых ТВ сигналов.

Квантование будем называть согласованным по плотности вероятности, если квантуется сигнал с плотностью вероятности $W(x)$, а пороги и уровни выбраны на основе (2.5.4) и (2.5.5). Квантователь будем называть согласованным по плотности вероятности и дисперсии, если квантуется сигнал с плотностью $W(x, \sigma^2)$, пороги и уровни выб-

раны на основе (2.5.4) и (2.5.5) для $W(x, \sigma^2)$. В противном случае квантователи будем называть несогласованными.

В [18] представлены результаты исследований робастности квантования когда: пороги и уровни квантования вычислены для функций распределения вероятности Лапласа $W_2(x, \sigma^2 = 1)$, квантуется сигнал с функцией распределения вероятности Лапласа $W_2(x, \sigma^2)$; пороги и уровни квантования вычислены для функций распределения вероятности Лапласа $W_2(x, \sigma^2 = 1)$, квантуется сигнал с функцией распределения вероятности Лапласа $W_2(x, \sigma^2)$; пороги и уровни квантования вычислены для функций распределения вероятности Лапласа $W_2(x, \sigma^2 = 1)$, но квантуется сигнал с функцией распределения вероятности Гаусса $W_1(x, \sigma^2)$; пороги и уровни квантования вычислены для функции распределений вероятности Гаусса $W_1(x, \sigma^2 = 1)$, квантуется сигнал с функцией распределения Гаусса $-W_1(x, \sigma^2)$ с дисперсией, не равной единице; пороги и уровни квантования вычислены для функций распределения Гаусса $W_1(x, \sigma^2 = 1)$, квантуется сигнал с функцией распределения Лапласа $W_2(x, \sigma^2)$ с дисперсией, не равной единице.

Исследования проводились с использованием выражений (2.5.1), (2.5.4), (2.5.5), в качестве вероятностной модели ТВ сигналов приняты (2.5.2) и (2.5.3). Расчеты проводились на ЭВМ. Алгоритм вычислений x_k, y_k заключается в следующем. Выбирается начальное приближенное значение y'_1 и затем на основе (2.5.4) и (2.5.5) вычисляются последующие значения x_k и y_k . На последнем этапе вычисляется y_N и проверяется условие (2.5.5) в интервале $[x_N, \infty]$. Если y_N удовлетворяет условию (2.5.5) в отмеченном интервале, то y'_1 выбрано правильно; в противном случае выбирается новое приближенное значение y'_1 и все повторяется заново. Как показали расчеты, если первое приближенное значение y'_1 далеко от истинного, вычислитель-

ный процесс не сходится. Исходя из вышеизложенного, первое прибли-
жение y'_1 находилось с помощью кривой компрессий на основе методи-
ки, изложенной в разделе 2.3.

На рис.2.5.1 и 2.5.2 приведены зависимости нормированной ошиб-
ки квантования D/σ^2 от дисперсии квантуемых сигналов для числа
уровней квантования $N = 8, 16$ (рис. 2.5.1 а,б) и $N = 32$
(рис.2.5.2). Пороги и уровни квантования вычислены согласно
(2.5.4) и (2.5.5) при $\sigma^2 = 1$.

Кривые на рисунках соответствуют следующим случаям: 1 - $W(x)$
 $= W_2(x)$ (согласно формуле (2.5.3)), x_k и y_k вычисляется на основе
(2.5.3)-(2.5.5); 2 - $W(x) = W_2(x)$ (на основе (2.5.3)), x_k и y_k вычис-
лены согласно (2.5.2) - (2.5.5); 3 - $W(x) = W_1(x)$ (согласно
(2.5.2)), x_k и y_k вычислены на основе (2.5.2), (2.5.4), (2.5.5); 4
- $W(x) = W_1(x)$, x_k и y_k вычислены на основе (2.5.3), (2.5.4),
(2.5.5).

С точки зрения предварительной оценки зависимости ошибки
квантования от дисперсии квантуемых сигналов и упрощения расчетов
осуществлена аппроксимация кривых 1,2,3 соответственно (рис.2.5.1б)
полиномом 2-й степени:

$$y = 0,001395 x^2 + 0,00119 x + 0,01824; \quad (2.5.6)$$

$$y = 0,001173 x^2 + 0,01322 x + 0,05865; \quad (2.5.7)$$

$$y = 0,001536 x^2 + 0,00385 x + 0,01514. \quad (2.5.8)$$

В этих выражениях $x = (\sigma^2 - 1,8)/0,4$. Выравнивание эксперимен-
тальных данных производилось на основе метода наименьших квадра-
тов. Выбор зависимостей, представленных на рис.2.5.1б, для аппрок-
симации обусловлен тем, что в системах ДИКМ ТВ сигналов для полу-
чения изображений с приемлемым качеством достаточно квантовать
сигнал на 16 уровней.

Анализ данных рис. 2.5.1 и 2.5.2 показывает, что наихудшие

результаты (с точки зрения робастности квантования) следует ожидать, когда квантователь согласован с распределением Гасса, но квантуется сигнал с распределением Лапласа (2.5.2). Согласованное по распределению квантование (кривые 1 и 3) можно считать робастным к малым отклонениям дисперсии ($\sigma^2 = 0,8 \dots 1$) от нормированной дисперсии $\sigma^2 = 1$. Наибольшая робастность обеспечивается при квантовании сигнала с распределением Гаусса (кривая 4 на рис.2.5.1), когда x_k и y_k согласованы с распределением Лапласа. Так, для $N=16,32$ нормированная ошибка квантования (кривая 4) остается почти на одном уровне в широком диапазоне изменения дисперсии ($\sigma^2 \approx 0,5 \dots 4$) квантуемых сигналов.

Для оценки зависимости минимума нормированной ошибки квантования от σ^2 на рис. 2.5.3 и 2.5.4 представлены зависимости D_H/D_1 от σ^2 , где $D_H = D/\sigma^2$ - нормированная ошибка квантования, D_1 - ошибка квантования при $\sigma^2 = 1$. Номера кривых соответствуют рис.2.5.1 и рис.2.5.2.

Анализ графиков показывает, что согласованное по распределению квантование, как и следовало ожидать, дает минимум ошибки при $\sigma^2 = 1$. Минимум ошибки несогласованного по $W(x)$ квантования достигается при дисперсиях, не равных единице. Например, когда квантователь согласован с распределением Гаусса, но квантуется сигнал с распределением Лапласа (кривые 2), минимум ошибки квантования достигается при $\sigma^2 = 0,5$. При $\sigma^2 = 1$ ошибка больше, но она такая же, как и для согласованного по распределению квантования. Часто процесс квантования выгодно оценивать на основе критерия отношения сигнал-шум квантования. Для оценки зависимости сигнал-шум квантования от дисперсии квантуемых сигналов построены графики рис.2.5.5 и 2.5.6. Анализ данных показывает, что при изменении дисперсий квантуемых сигналов в широких пределах ($\sigma^2 \approx 0,5 \dots 4$) наибольшая ро-

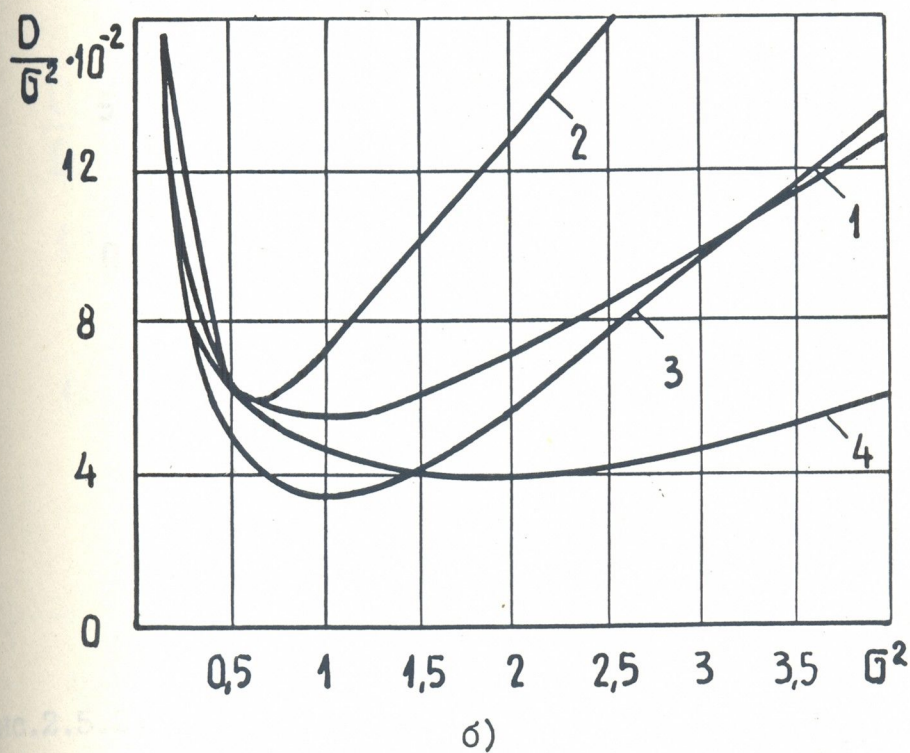
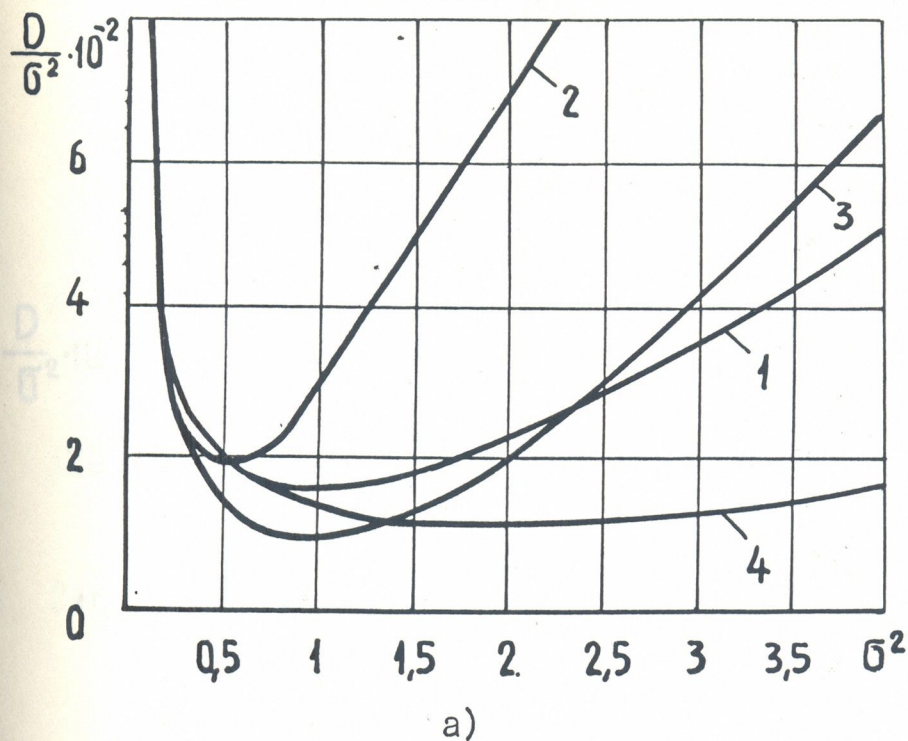


Рис.2.5.1 Зависимости нормированной ошибки квантования от дисперсии квантуемых ТВ сигналов: а - $N = 16$;
б - $N = 8$

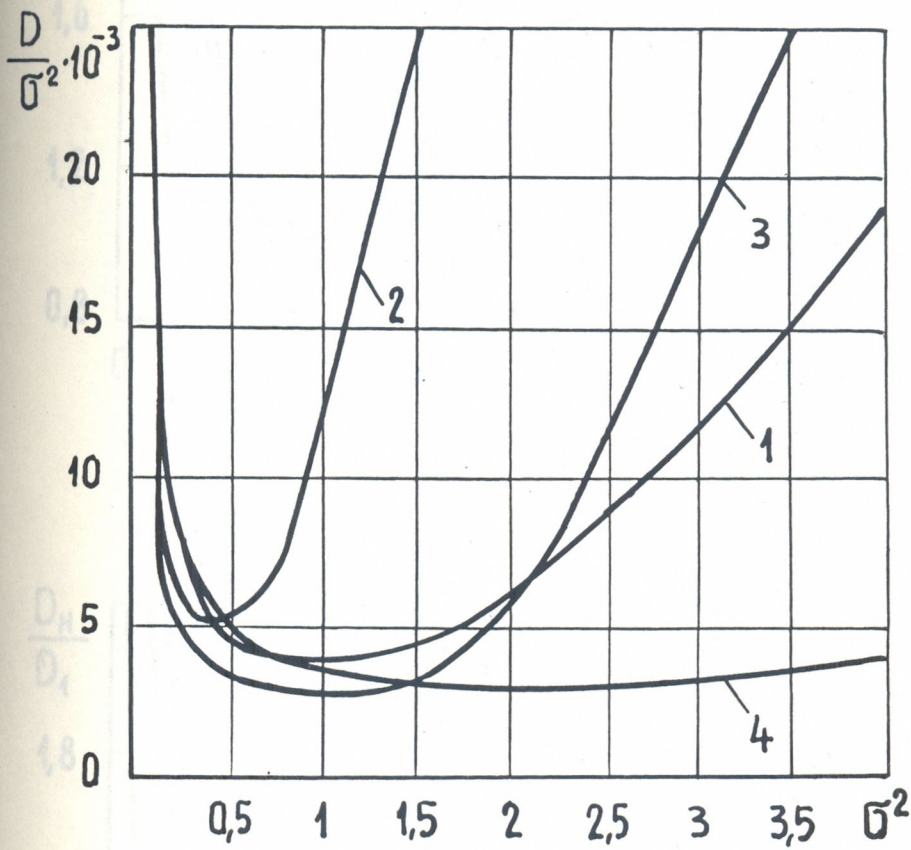
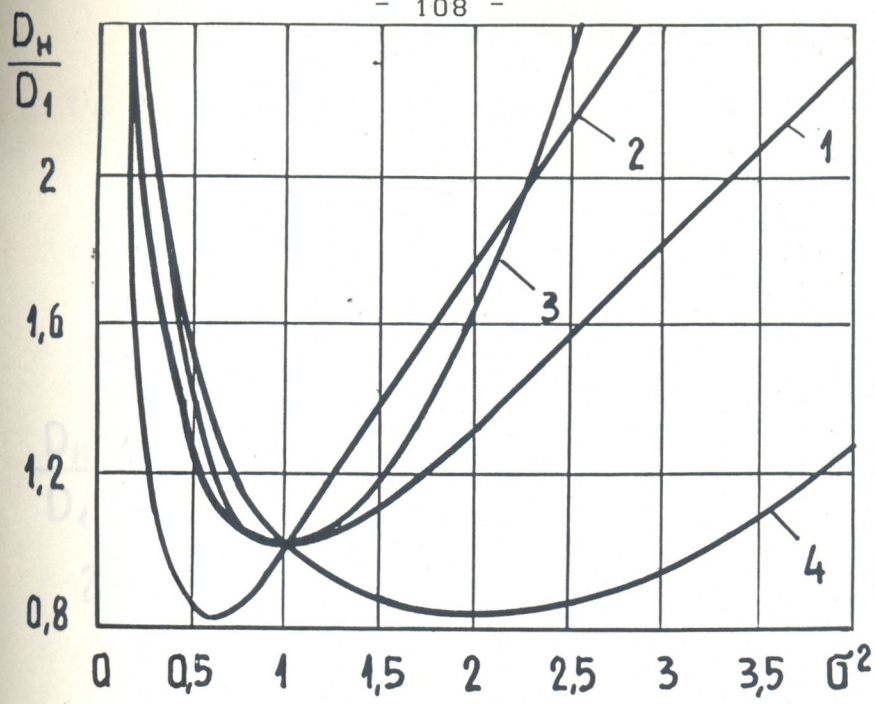
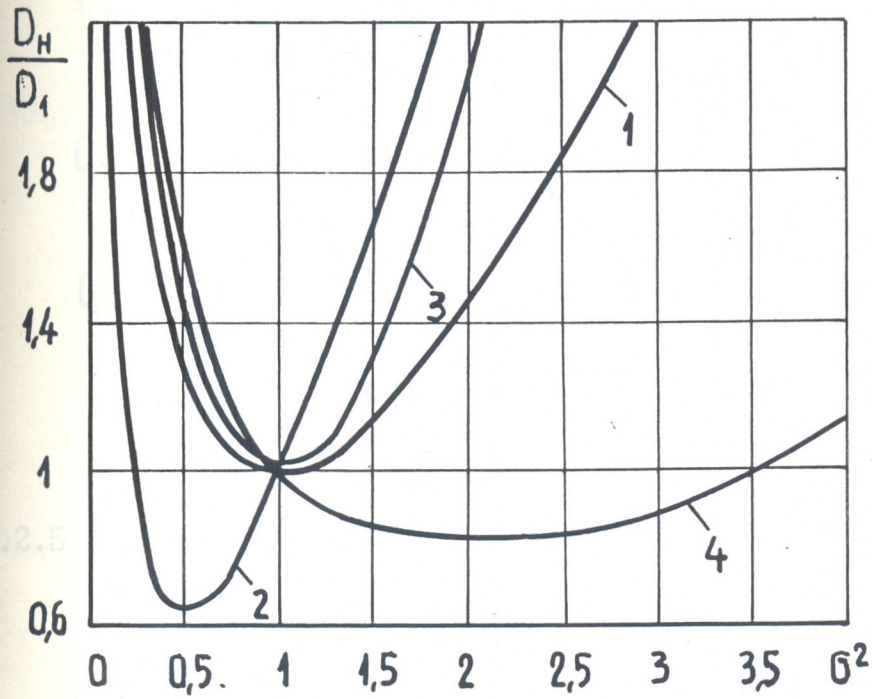


Рис.2.5.2. Зависимость нормированной ошибки квантования от дисперсии квантуемых ТВ сигналов для $N = 32$



a)



б)

Рис.2.5.3 Зависимости нормированной относительной ошибки квантования от дисперсии квантуемых ТВ сигналов:
а - $N = 8$; б - $N = 16$.

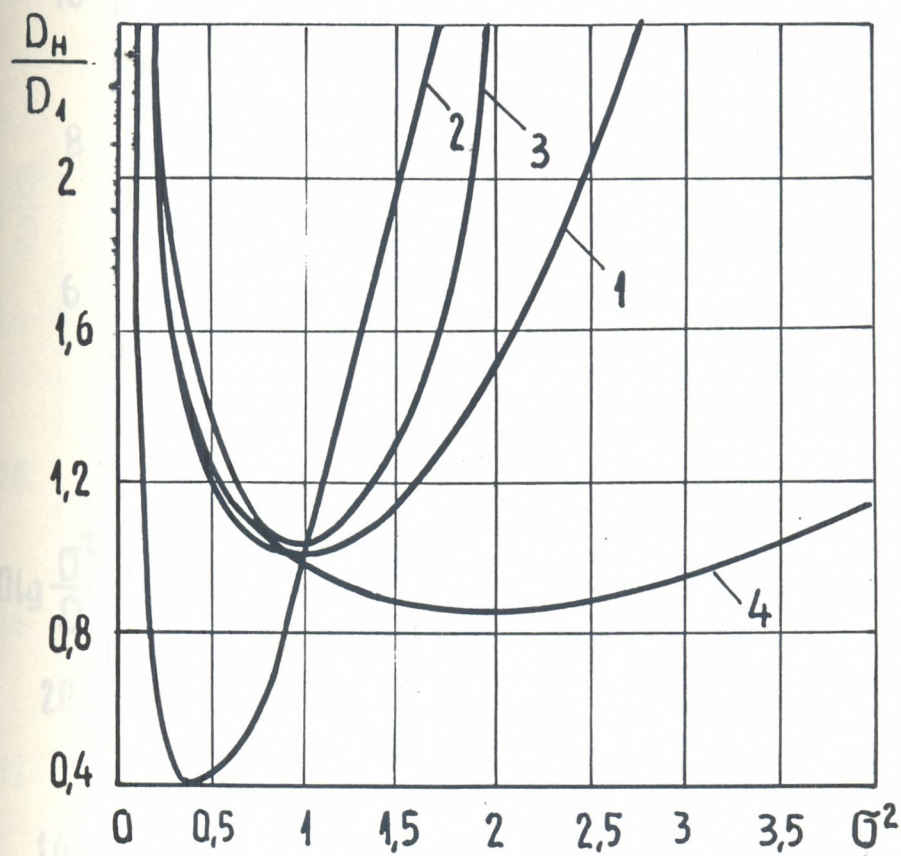


Рис.2.5.4. Зависимость нормированной относительной ошибки квантования от дисперсии квантуемых ТВ сигналов при $N = 32$.

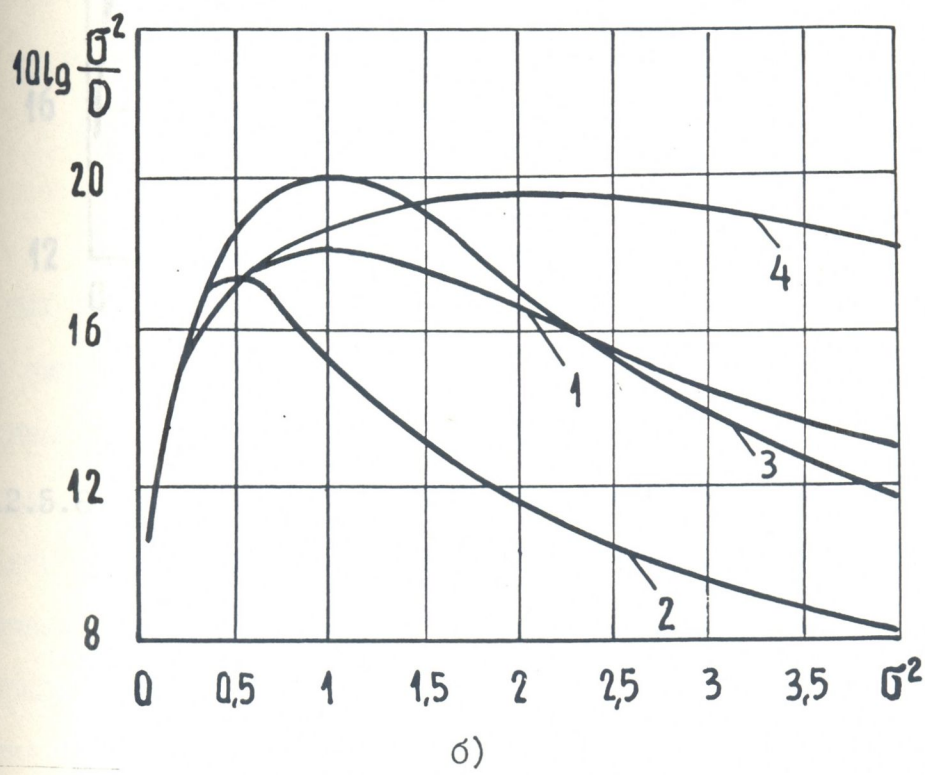
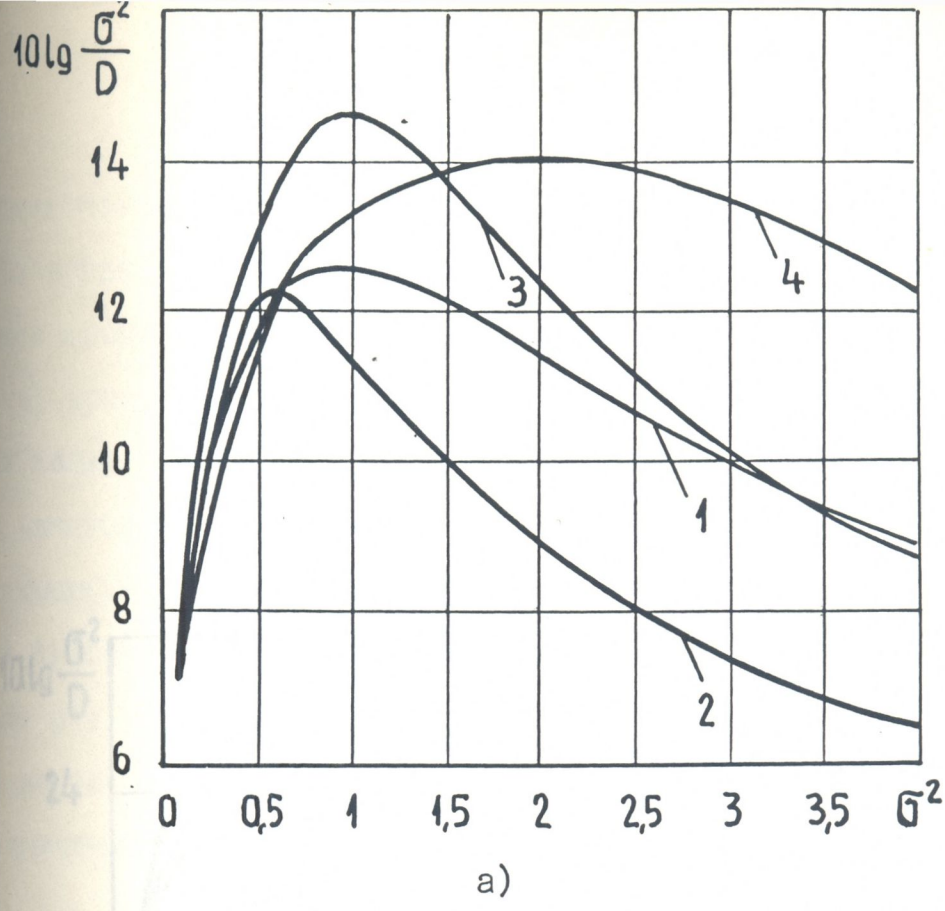


Рис.2.5.5. Зависимости отношения мощности сигнала к нормированной ошибке квантования от дисперсии ТВ сигналов:
 а - $N = 8$; б - $N = 16$

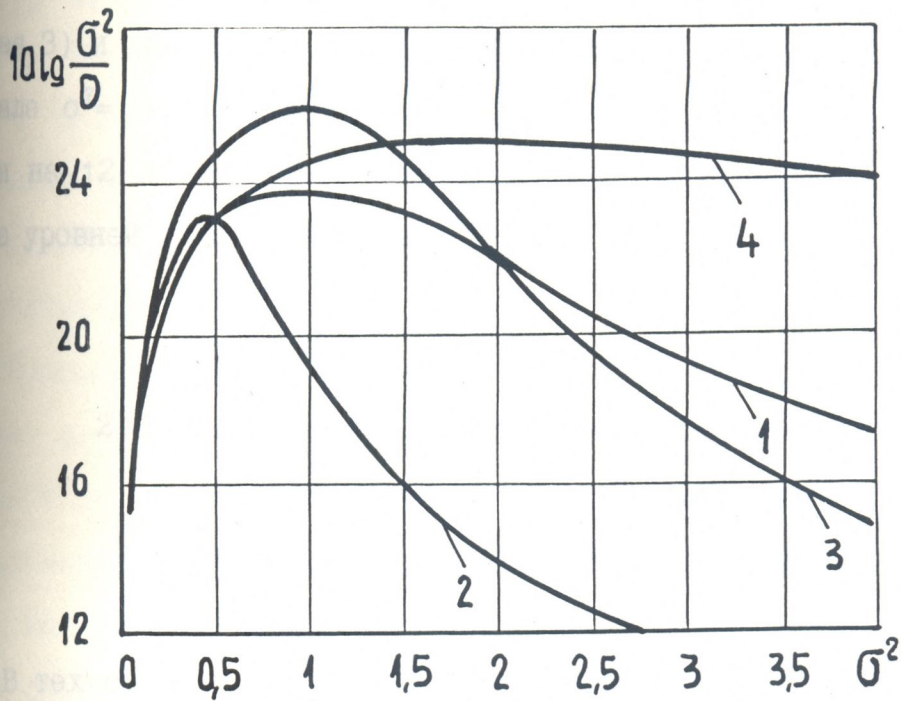


Рис.2.5.6 Зависимость отношения мощности сигнала к нормированной ошибке квантования от дисперсии ТВ сигналов при $N = 32$.

бастность обеспечивается при квантовании сигнала с распределением Гаусса, когда пороги и уровни квантователя согласованы с распределением Лапласа. Характерная особенность зависимостей (рис.2.5.5. и 2.5.6, кроме кривых 4) состоит в том, что при увеличении дисперсии квантуемых сигналов выше нормированного значения ($\sigma^2 = 1$), когда квантователь согласован по дисперсии, отношение сигнал-шум квантования уменьшается значительно. Так, когда $N = 32$ (рис.2.5.6, кривая 3) и дисперсия квантуемых сигналов принимает значения в интервале $\sigma^2 = 1 \dots 4$, отношение сигнал-шум квантования уменьшается почти на 12 дБ по сравнению с $\sigma^2 = 1$, что равносильно уменьшению числа уровней квантования в 4 раза.

2.6 Оптимизация процесса квантования с учетом статистических свойств ТВ изображений и особенностей их зрительного восприятия

В тех случаях, когда ТВ изображение предназначено для определенного типа получателя сообщений (например, зрительной системы), при оптимизации процесса квантования следует учитывать и свойства получателя (в частности, психофизические свойства или ограничения зрительного восприятия). По-видимому, учет свойств получателя позволит повысить эффективность процесса квантования ТВ сигналов. Таким образом, возникает задача оценки верности воспроизведения сообщения с учетом свойств получателя. Как показано в [97], верность воспроизведения при самых общих условиях можно оценить на основе выражения:

$$V [W(x,z)] = \int \int W(x,z) \rho(x,z) dx dz, \quad (2.6.1)$$

здесь $\rho(x, z)$ - функция критерия (функция оценки); $W(x, z)$ - совместная плотность вероятности переданного и принятого сигнала.

Так как выходной сигнал квантователя зависит только от плотности вероятности входного сигнала $W(x)$, выражение (2.6.1) можно преобразовать:

$$V[W(x)] = \sum_{k=1}^N \int W(x) \rho(x, y_k) dx, \quad (2.6.2)$$

где y_k - уровни квантования; $\rho(x, y_k)$ - функция критерия, конкретный вид которой зависит от получателя сообщений.

В ряде работ по кодированию ТВ изображений [45, 56, 69] предполагалось использовать свойства зрительной системы для уменьшения необходимого числа уровней квантования и улучшения качества декодированных ТВ изображений.

Поскольку известно [95], что зрительное ощущение пропорционально логарифму интенсивности стимула, для согласования квантователя с этим свойством зрительного восприятия предлагалось при квантовании ТВ сигналов использовать логарифмическую шкалу. Как было показано в [53], такое квантование позволяет снизить необходимое число уровней квантования в два раза по сравнению с равномерным квантованием.

Для того, чтобы различие между кодированным и некодированным изображениями было субъективно малым, необходимо, чтобы это различие приближалось к зрительному порогу. Обычный критерий минимума среднеквадратичной ошибки квантования не учитывает пороговых свойств зрительной системы.

С целью учета особенностей зрительного восприятия искажений в [56] предложено оценить эффективность квантования на основе так называемой модифицированной среднеквадратичной меры искажений с использованием функции, учитывающей как статистику ТВ сигнала, так и особенности зрительного восприятия изображений. В работах

[72,74-76] для построения квантователей ТВ сигналов использовались пороговые функции заметности, определяющие чувствительность зрительной системы к искажениям квантования. Такие функции часто называются функциями маскирования [72], так как последние отображают снижение видности искажений около границы резких перепадов яркости по сравнению с видностью искажений вблизи плавных переходов яркости. В [77] при оценке эффективности квантования плотность вероятности ТВ изображений заменена так называемой вероятностной функцией заметности, учитывающий эффект визуального маскирования искажений квантования. В работе [74] исследованы пороги заметности специфических искажений квантования ТВ изображений при ДИКМ путем моделирования этих искажений на ЭВМ. В работах [70,145] измерены пороги заметности различных типовых искажений квантования при ДИКМ. В [72,73] на основе экспериментально полученных порогов заметности специфических искажений квантования предложены графические методы расчета шкал квантования для ДИКМ ТВ изображений. В [73] предложен алгоритм расчета шкал квантования на ЭВМ методом динамического программирования, а модификация этого алгоритма, проведенная с целью уменьшения необходимого времени расчета на ЭВМ, предложена в [96].

Однако следует заметить, что некоторые аспекты расчета шкал квантования с учетом особенностей зрительного восприятия специфических искажений квантования требовали дальнейших исследований.

Как известно, при цифровом кодировании ТВ сигналов возникают специфические искажения – шумы квантования. В зависимости от числа уровней квантования и распределения этих уровней (по динамическому диапазону квантуемого ТВ сигнала) шумы проявляются на изображении по-разному. Поскольку ниже исследуются свойства зрительного восприятия специфических искажений квантования наряду с особенностями

статистических характеристик квантуемых сигналов при оптимизации процесса квантования, рассмотрим специфические искажения, сопутствующие процессу квантования ТВ изображений.

Ошибки квантования в принципе носят случайный характер, однако для анализа искажений квантования их условно можно разделить на случайные и детерминированные. Условность заключается в том, что некоторые искажения при выбранной шкале квантования можно предсказать (например, перегрузки) и при заданном числе уровней квантования уменьшить или устранить (например, перегрузки с ограничением) надлежащим выбором шкалы квантования. Следует отметить также, что заметность искажений квантования зависит от метода кодирования и характера кодируемых изображений.

В соответствии с [40] на рис.2.6.1 представлена классификация искажений квантования ТВ изображений. Последние могут быть условно подразделены следующим образом.

Ложные контуры. Шумы квантования проявляются в виде ложных контуров на квантованом ТВ изображении, если число уровней равномерного квантования меньше 64 для систем с ИКМ [45-47] и меньше $8 \cdot 16$ для систем с ДИКМ [45,46,53]. Ложные контуры следует отнести к случайным искажениям. Они наблюдаются на гладких участках изображения из-за сильной межстрочной и межэлементной корреляции. Поскольку на таких участках изображения яркость вдоль соседних строк плавно меняется, при квантовании плавные переходы представляются в виде ступенек - ложных контуров. Заметность (видность) ложных контуров можно уменьшить добавлением к исходному сигналу псевдослучайного шума [40,146-148]. Шум разбивает ложные контуры, и глаз уже не может просуммировать перепады яркости на соседних строках, объединив их в контур. Добавление шума (так называемая рандомизация) осуществляет частичную декорреляцию квантуемого

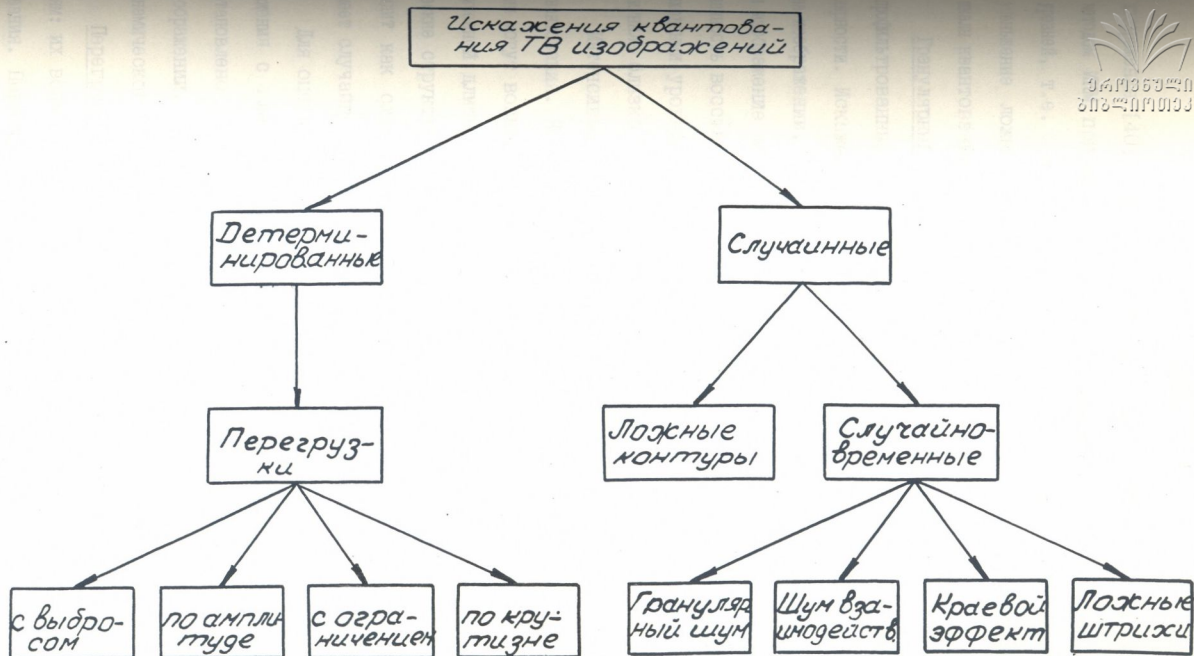


Рис. 2.6.1 Классификация специфических искажений квантования телевизионных сигналов

изображения [40] Для получения высококачественных ТВ изображений методом ИКМ при равномерном квантовании требуется от 128 до 256 уровней, т.е. 7-8 бит/эл. При заданном числе уровней квантования уменьшение ложных контуров можно осуществить надлежащим выбором шкалы квантования.

Гранулярный шум. В системах с ДИКМ разность между входным и профильтрованным восстановленным сигналом называется шумом гранулярности. Искажения, вызванные гранулярным шумом, наиболее заметны на изображении, когда разностный сигнал меняется от кадра к кадру и изображение малоподвижно. При декодировании возникает неоднозначность восстановления, которая вызвана осцилляцией сигнала между входными уровнями (порогами квантования), когда значение входного сигнала близко к порогу квантования.

Интенсивность гранулярного шума определяется наименьшим шагом квантования. Когда сигнал имеет постоянное значение, на изображении могут возникнуть искажения в виде периодических структур ограниченной длительности. Для зашумленного входного сигнала периодические структуры на изображении незаметны, и гранулярный шум выглядит как случайный, похожий на шум источника. Гранулярный шум имеет случайно-временной характер.

Для оценки заметности гранулярного шума следует выбрать изображения с гладкими участками переходов яркости. Экспериментально установлено [51,74], что гранулярный шум незаметен на квантованном изображении, если наименьший шаг квантования не превышает $2/256$ динамического диапазона сигнала.

Перегрузки можно условно отнести к детерминированным искажениям: их возможно, в принципе, подсказать при заданной шкале квантования. Перегрузки могут иметь различный характер. В системах с ИКМ наблюдаются перегрузки по амплитуде, а в системах с ДИКМ к ним

добавляются и перегрузки по крутизне. Их, в свою очередь, можно разделить на перегрузки с выбросом, с ограничением и собственно перегрузки по крутизне. Последние возникают, когда крутизна исходного сигнала превышает максимальную крутизну, которую может восстановить система.

При кодировании ТВ сигналов методом ДИКМ вероятность больших значений ошибки предсказания мала для большинства изображений, поэтому при кодировании используют квантователи с ограниченным динамическим диапазоном. Вследствие этого большая ошибка предсказания при большой крутизне не может быть восстановлена за один отсчет, что вызывает сглаживание резких переходов яркости. Для удобства следует различать перегрузки по крутизне и перегрузки с ограничением. Если ошибка предсказания близка к уровню квантования y_k , она будет восстановлена уровнем y_k , и шум квантования $y_k - \varepsilon_n$ будет меняться в пределах $\pm\Delta$ ($\Delta > 0$). Если ошибка предсказания ε_n положительна (переход черного на белый) или отрицательна (переход белого на черный), искажение будет иметь вид подчеркивания или смазывания контура (в зависимости от знака $y_k - \varepsilon_n$). Если ошибка предсказания превышает наивысший уровень квантования, искажение имеет типичный характер перегрузки по крутизне.

Основная задача при уменьшении перегрузки по крутизне состоит в выборе такого максимального значения уровня квантования, которое может предотвратить появление ложных контуров. Экспериментально установлено [149], что когда максимальный уровень квантования равен $0,5 E$, где E - максимальное значение сигнала, заметны ложные контуры, а при $y_{\max} = 0,25 E$ сглаживание границ яркостных переходов (перегрузки по крутизне).

Для уменьшения шумов перегрузки наибольший шаг квантования рекомендуется выбрать не менее $32/128$ динамического диапазона

квантуемого сигнала [51].

В качестве типовых изображений при оценке шумов перегрузки по крутизне целесообразно выбрать изображение с высокой детальностью и резкими переходами.

Краевой эффект. Когда ошибка предсказания ε_n близка к порогу квантования ($x_k \approx \varepsilon_n$), любая флуктуация (шум источника, гранулярный шум) перебрасывает уровень восстановления случайно от строки к строке и от кадра к кадру между y_k и y_{k+1} .

Краевой эффект (мерцание краев) на изображении наблюдается как шум, сконцентрированный в участках, где ε_n находится близко к порогу x_k . Этот шум имеет бимодульный характер в критических точках $\pm\Delta$ (где $\Delta = y_{k+1} - y_k / 2$) [70] и появляется в начале или в конце контура в зависимости от знака ε_n .

Краевой эффект наблюдается на изображении в виде флуктуации краев контура. Каждая локализация шума имеет свой порог видности, который зависит от параметров наклона (одноэлементный или двухэлементный переход, наименьший уровень, контраст). Краевой эффект имеет случайно-временной характер. Его интенсивность наибольшая, когда шаг квантования для больших ошибок предсказания выбран слишком большим.

Для оценки искажений краевого эффекта следует выбрать изображения с высокой длительностью и перепадами с большим значением разностного сигнала. На порог видности краевого эффекта влияет и рекурсивный характер ДИМ кодера; как показали исследования [72,74], сразу после контура шум квантования увеличивается. Этот шум имеет случайно-временной характер и является шумом взаимодействия, который наблюдается на изображении в виде случайного шума после контура. Его следует отличать от краевого эффекта.

Ложные штрихи на ТВ изображении появляются при смещении

порогов и уровней квантования со своих номинальных позиций, а также из-за шумов в канале связи. Полная среднеквадратическая ошибка, связанная со смещением порогов квантования x_k и уровней y_k , может быть записана [86]

$$E = \sum E_k^2 = (\Delta^2/12 + \sum x_k^2) + \sum y_k (x_{k+1} - x_k - \Delta x_k - \Delta x_{k-1}) + \sum y_k (\Delta + x_k - x_{k-1}), \quad (2.6.3)$$

где Δ - ширина интервала квантования.

Если все смещения y_k при декодировании равны нулю, то

$$E = \Delta^2/12 + \bar{x}_k^2; \quad (2.6.4)$$

здесь $\bar{x}_k^2 = \Delta \sum x_k^2$ - среднеквадратическое смещение при декодировании.

Когда смещения при кодировании и декодировании в отдельности значительны, но некоррелированы, для среднеквадратичной ошибки имеем

$$E = (\Delta^2/12) + \bar{x}_k^2 + \bar{y}_k^2 \quad (2.6.5)$$

Уменьшение смещения порогов и уровней квантования следует осуществить путем повышения стабильности характеристик квантователя.

Искажения при ВК можно разделить на три класса: искажение "блочная структура", в областях плавного изменения яркости изображения, "вымывание текстуры" изображения и искажение типа "лестничная структура", возникающая на контурной части изображения. Основными причинами этих трех типов искажений являются: малый размер кодовой книги и использование меры искажений не учитывающий свойство зрительного восприятия.

Как показали исследования [1,2,5,82], определяющим является размер кодовой книги ВК. При увеличении размера кодовой книги и сохранения постоянной скорости, качество восстановленного изобра-

жения улучшается, по сравнению с тем случаем, когда размер кодовой книги меньше, но скорость такая же. Как показали наши экспериментальные исследования [1,5] использование различной меры искажений (например, переход от среднеквадратической меры искажений к среднему модулю ошибки), незначительно влияет на качество восстановленного изображения. Тогда как, увеличение скорости ВК на один бит заметно улучшает качество восстановленных изображений [127]. К сожалению, увеличение размера кодовой книги, в настоящее время, вызывает непреодолимые вычислительные трудности, что практически затрудняет векторное квантование с большой (со скоростью большей чем 12-14 бит) кодовой книгой. Эту проблему можно обойти с использованием объединенных кодовых книг, которые менее чувствительны к изменениям характера изображения т.е. они обладают робастностью (см. главу III).

2.7. Квантование ТВ изображений с учетом весовой

функции заметности искажений ошибок квантования

Критерий минимума среднеквадратичной ошибки не учитывает особенностей зрительного восприятия искажений квантования, поэтому целесообразно расчет шкал квантования ТВ изображений осуществлять с учетом особенностей зрительного восприятия этих искажений. Учет особенностей зрительного восприятия особенно эффективен, при оптимизации процесса квантования в системах ДИКМ ТВ изображений.

Оптимизация процесса квантования ТВ изображений на основе критерия минимума среднеквадратичной ошибки, как известно [65], осуществляется с использованием выражения

$$D = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x - y_k)^2 W(x) dx, \quad (2.7.1)$$

где $W(x)$ — плотность вероятности ТВ изображений.

Исследования показали, что шкалы, подобранные экспериментально, путем субъективных экспертиз [149], отличаются от шкал квантования, полученных на основе минимизации (2.7.1), а качество восстановленного изображения для субъективно оптимизированных квантователей выше, чем для квантователей, оптимизированных по критерию минимума среднеквадратической ошибки (когда в качестве весовой функции использована только плотность вероятности ТВ изображений).

Различие между субъективно-оптимальными и среднеквадратически оптимальными шкалами квантования может быть вызвано тем, что в (2.7.1) учитываются только свойства источника сигнала (в частности, ТВ сигналов) и не учитываются свойства получателя (т.е. зрительного восприятия). Если в (2.7.1) плотности вероятности $W(x)$ заменить некоторой функцией $P(x)$, которая будет учитывать как ста-

статистические свойства ТВ сигналов, так и психовизуальные свойства зрения (ограничения зрительного восприятия), то можно ожидать, что квантователь, рассчитанный на основе такой функции обеспечит получение субъективного качества кодированных ТВ изображений. В качестве такой функции $P(x)$ можно использовать функцию заметности искажений. В работе [56] для аппроксимации $P(x)$ предложено выражение

$$P(x) = [W(x)]^\alpha / m(x); \quad (2.7.2)$$

здесь $P(x)$ — функция заметности искажений; $W(x)$ — плотность вероятности ТВ сигнала; $m(x)$ — функция маскирования; α — эмпирический коэффициент.

Функция маскирования характеризует пороговые свойства зрительного восприятия и связана с заметностью искажений квантования ТВ сигналов. Эффект пространственного маскирования проявляется в снижении заметности искажений около границы высококонтрастных переходов яркости по сравнению с заметностью искажений в малоконтрастных областях искажений.

Функция маскирования находится экспериментальным путем. В качестве аппроксимации функции маскирования может быть использовано предложенное в [56], выражение

$$m(x) \approx K e^{-0,04x}, \quad (2.7.3)$$

где K — некоторый коэффициент.

В (2.7.2) значение коэффициента α зависит от длительности наблюдения изображений. Согласно [56], когда изображение предъявляется наблюдателю на короткое время, $\alpha = 0,4$, а когда изображение предъявляется на длительное время, $\alpha = 0,2$. Анализ [28] показывает, что значение α увеличивает или уменьшает вес плотности вероятности при определении функций заметности $P(x)$. В действительности, когда $\alpha = 0$ плотность вероятности не влияет на функцию виднос-



ти и она полностью определяется величиной $m(x)$. При $\alpha = 1$ плотность вероятности имеет максимальный вес при определении $P(x)$.

Для функции заметности нами были рассчитаны уровни и пороги квантования при ДИКМ ТВ сигналов. В качестве модели плотности вероятности использовалась функция Лапласа.

Целью проведенных расчетов являлось:

- 1) выявление влияний величины коэффициента α , в выражении (2.7.2), на распределение уровней и порогов квантования;
- 2) сравнение полученных шкал квантования со шкалами, определенными на основе субъективных экспертиз.

Вычисления проводились на основе методики, изложенной нами в разделе 2.3 [28]. В табл.2.7.1 (столбцы I, IV, VI, VII) приведены результаты расчетов оптимальных порогов и уровней квантования с использованием статистических характеристик ТВ сигналов и функции заметности (2.7.2); в столбцах II, V, VIII показаны значения оптимальных уровней квантования $z_k = y_k / y_1$, а в столбце III в качестве примера приведены заимствованные из работы [149] шкалы квантования ТВ сигналов, найденные экспериментальным подбором порогов и уровней квантования. Все данные табл.2.7.1 представлены в единицах $1/256$ при числе уровней квантования $N = 8, 16, 32$.

Анализ данных табл.2.7.1 показывает, что теоретически рассчитанные шкалы квантования, с учетом функций заметности и статистических характеристик ТВ сигналов (столбец II), практически мало отличаются от экспериментально подобранных шкал (столбец III). Это дает основание считать, что предложенная модель учета свойств зрения и статистических характеристик ТВ сигналов для расчета шкал квантования может быть использована при проектировании квантователей ДИКМ ТВ сигналов.

В столбце VI для сравнения представлены (заимствование из

[149]) шкалы квантования, рассчитанные на основе учета только статистических характеристик сигнала (для плотности вероятности Лапласа).

Общий анализ табл.2.7.1 показывает, что квантователи, оптимизированные на основе критерия минимума среднеквадратической ошибки, имеют более компрессированную характеристику, чем квантователи, минимизирующие ошибку квантования на основе учета функций заметности и плотности вероятности ТВ изображений. В процессе расчетов было выявлено [20], что шкалы квантования, рассчитанные для различных значений коэффициента α ($\alpha = 0,2$ и $\alpha = 0,4$), практически не отличаются друг от друга. Это означает, что выбор порогов и уровней квантования не зависит от длительности наблюдения квантованного ТВ изображения.

При квантовании ТВ сигналов на основе функций видности ошибка квантования как бы взвешивается в соответствии с изменением функции $P(x)$. Однако, как с теоретической, так и практической точки зрения представляет интерес такое квантование ТВ изображений, когда ошибка квантования будет ниже порога заметности искажений яркостных переходов ТВ изображений.

Таблица 2.7.1

Параметры квантования

I		II	III	IV		V	VI		VII		VIII
N = 8		N = 8	N = 8	N = 16		N = 16	N = 16		N = 32		N = 32
x_k	y_k	z_k	z_k	x_k	y_k	z_k	x_k	y_k	x_k	y_k	z_k
2	2	1	1	0	2	1	0	2	0	2	1
4	7	3	3	4	6	3	4	6	4,5	6	3
11	15	7	7	9	12	6	9	12	8	11	6
21	28	14	15	15	18	9	15	18	13	16	8
-	-	-	-	22	26	13	21	25	18	21	10
-	-	-	-	31	37	18	39	35	24	27	13
-	-	-	-	44	52	26	41	48	30	33	17
-	-	-	-	64	77	39	60	72	36	40	20
-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	48	24
-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	57	29
-	-	-	-	-	-	-	-	-	62	68	34
-	-	-	-	-	-	-	-	-	74	81	40
-	-	-	-	-	-	-	-	-	89	97	48
-	-	-	-	-	-	-	-	-	107	118	59
-	-	-	-	-	-	-	-	-	133	148	74
-	-	-	-	-	-	-	-	-	173	199	99

2.8. Расчет шкал квантования при ДИКМ ТВ сигналов с использованием зрительных порогов заметности искажений

Известно [53], что шумы квантования менее заметны вблизи больших перепадов яркости, чем на участках ТВ изображений с плавными переходами. Это свойство зрения известно как эффект пространственного маскирования. В работе [77] для построения квантователя с учетом свойств зрения использовалась зависимость заметности шума квантования от межэлементной разности квантуемых ТВ сигналов. В [71] путем субъективных тестов найдены плотности функции заметности для яркостного и цветовых составляющих ТВ сигнала. Функция заметности для заданного ТВ изображения находилось путем определения визуального восприятия добавленного шума в тех местах ТВ изображений, где межэлементная разность ТВ сигналов превышала заданный порог. Такая функция заметности позволяет рассчитать шкалы квантования с помощью уравнений Макса [65], если вместо плотности вероятности использовать функцию заметности. Экспериментальные исследования [72] показали, что если шумы квантования находятся ниже определенного порога, они не воспринимаются наблюдателем.

Следует отметить, что в работах [72–74] расчет шкал квантования с использованием пороговой функции заметности искажений яркостных переходов осуществлялся графическим способом или методами динамического программирования. Очевидно, что графический способ расчета является трудоемким и не всегда обеспечивает достаточную точность вычислений, а метод динамического программирования связан с большим объемом вычислений.

Целью данного раздела диссертации является вывод аналитических уравнений для расчета шкал квантования ТВ изображений с ис-



пользованием амплитудных порогов заметности искажений границ яркостных переходов, что позволяет упростить процедуру расчета оптимальных параметров квантования.

Амплитудные пороги, используемые для расчета шкал квантования, можно измерить по методике [72]. Телевизионный экран, разделенный на две части, имеет яркость α_0 на одной половине и $\alpha_0 + x$ на другой. Граница перехода имеет ширину, равную длительности одного элемента изображения. Затем яркость на границе перепада яркости искажается на величину $\pm \Delta\alpha$, и яркость перепада будет $\alpha_0 + x + \Delta\alpha$ и $\alpha_0 + x - \Delta\alpha$. Пороговая функция определяется как $\Delta\alpha$, при которой условная вероятность

$$P(\Delta\alpha | x) = 0,5.$$

Условную вероятность можно аппроксимировать функцией

$$P(\Delta\alpha | x) = \begin{cases} 0 & \Delta\alpha \leq T(x), \\ 1 & \Delta\alpha > T(x), \end{cases} \quad (2.8.1)$$

где $T(x)$ — функция амплитудного порога заметности искажения границ.

Использование пороговой функции видности позволяет рассчитать квантователь ТВ сигналов, который позволит поддерживать шумы квантования ниже порога их заметности. Тогда квантование можно оптимизировать на основе так называемого критерия надпороговой субъективной среднеквадратичной ошибки [72]:

$$D_H = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} [|x - y_k|^2 - T^2(x)] \theta[|x - y_k| - T(x)] p(x) dx, \quad (2.8.2)$$

где $p(x)$ — функция заметности, а $\theta(\eta)$ — функция Хевисайда, которая определяется в виде

$$\theta(\eta) = \theta[|x - y_k| - T(x)] = \begin{cases} 1 & |x - y_k| \leq T(x), \\ 0 & |x - y_k| > T(x). \end{cases} \quad (2.8.3)$$

Поскольку в (2.8.2) входит функция Хевисайда, которая в обычном смысле недифференцируема, нахождение минимума D_H путем непосредственного дифференцирования (2.8.2) не представляется возможным. Однако, учитывая свойство функции $\theta(\eta)$, можно преобразовать (2.8.2) в удобную форму [19,29]. С учетом того, что $x_k < y_k < x_{k+1}$, преобразуем интеграл, входящий в (2.8.2):

$$\begin{aligned} I^2 &= \int_{x_k}^{x_{k+1}} [(x - y_k)^2 - T^2(x)] \theta[|x - y_k| - T(x)] p(x) dx = \\ &= \int_{x_k}^{y_k} [(x - y_k)^2 - T^2(x)] \theta[(y_k - x) - T(x)] p(x) dx + \\ &+ \int_{y_k}^{x_{k+1}} [(x - y_k)^2 - T^2(x)] \theta[(x - y_k) - T(x)] p(x) dx. \quad (2.8.4) \end{aligned}$$

Как показали экспериментальные исследования [69,70], функция $T(x)$ имеет линейный характер:

$$T(x) = a + bx. \quad (2.8.5)$$

С точки зрения удобства численных расчетов, $T(x)$ на интервале (x_k, y_k) будем аппроксимировать функцией $T(x_k)$, а на интервале (y_k, x_{k+1}) — функцией $T(x_{k+1})$. Это означает, что на интервале (x_k, y_k) погрешность квантования не должна превышать $T(x_k)$, а на интервале (y_k, x_{k+1}) — $T(x_{k+1})$.

Уравнение (2.8.4) можно преобразовать :

$$\begin{aligned}
 I^2 &= \int_{x_k}^{y_k} [(x - y_k)^2 - T^2(x_k)] \Theta [(y_k - x) - T(x_k)] p(x) dx + \\
 &+ \int_{y_k}^{x_{k+1}} [(x - y_k)^2 - T^2(x_{k+1})] \Theta [(x - y_k) - T(x_{k+1})] p(x) dx = \\
 &= \int_{x_k}^{y_k - T(x_k)} [(x - y_k)^2 - T^2(x_k)] p(x) dx + \int_{y_k + T(x_{k+1})}^{x_{k+1}} [(x^2 - y_k^2) - T^2(x_{k+1})] p(x) dx.
 \end{aligned}
 \tag{2.8.6}$$

Для нахождения x_k и y_k продифференцируем уравнение (2.8.6).

Будем иметь:

$$\begin{aligned}
 dI^2/dy_k &= -2 \int_{x_k}^{y_k - T(x_k)} (x - y_k) p(x) dx + [(y_k - T(x_k) - y_k)^2 - \\
 &- T^2(x_k)]^2 p(y_k - T(x_k)) - 2 \int_{y_k + T(x_{k+1})}^{x_{k+1}} (x - y_k) p(x) dx - \\
 &\left\{ [(y_k - T(x_{k+1}) - y_k)^2 - T^2(x_{k+1})] p(y_k + T(x_{k+1})) \right\}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

После решения уравнений $dI^2/dy_k = 0$ для y_k получим:

$$y_k = \frac{\int_{x_k}^{x_{k+1}} xp(x) dx - \int_{y_k + T(x_{k+1})}^{y_k + T(x_{k+1})} xp(x) dx}{\int_{x_k}^{x_{k+1}} p(x) dx - \int_{y_k - T(x_k)}^{y_k + T(x_{k+1})} p(x) dx}.
 \tag{2.8.8}$$

При $T(x) \equiv 0$, т.е. когда пороговое свойство зрения не учитывается, (2.8.8) переходит в хорошо известное уравнение Макса для расчета уровней квантования [65]:

$$y_k = \int_{x_k}^{x_{k+1}} xp(x) dx / \int_{x_k}^{x_{k+1}} p(x) dx.$$



041936920
2018-10-10 10:33

Для нахождения порогов квантования продифференцируем (2.8.8) по x_k и после решения $dI^2/dx_k = 0$, будем иметь [19]:

$$p(x_k) [2x_k(y_k - y_{k-1}) + y_{k-1}^2 - y_k^2] - 2bT(x_k) \int_{y_{k-1}+T(x_k)}^{y_k+T(x_k)} p(x) dx = 0, \quad (2.8.9)$$

При $T(x) = 0$

$$x_k = (y_k + y_{k-1})/2,$$

что совпадает с выражением Макса [65] для порогов квантования.

Таким образом, полученные нами уравнения (2.8.8) и (2.8.9) являются обобщенными уравнениями оптимального квантования с учетом пороговой функции заметности.

Когда критерием оценки оптимальности квантования служит абсолютная погрешность квантования, для ошибки квантования с учетом $T(x)$ будем иметь [19]:

$$D_A = \sum_{k=1}^N \int_{x_k}^{x_{k+1}} [|x - y_k| - T(x)] \theta [|x - y_k| - T(x)] p(x) dx. \quad (2.8.10)$$

Преобразуем (2.8.10). С учетом (2.8.3) интеграл, входящий в (2.8.10), преобразуется следующим образом:

$$\int_{x_k}^{y_k - T(x_k)} [(y_k - x) - T(x_k)] p(x) dx + \int_{y_k + T(x_{k+1})}^{x_{k+1}} [(x - y_k) - T(x_{k+1})] p(x) dx. \quad (2.8.11)$$

После дифференцирования по y_k и приравнивания результата к нулю

$$\int_{x_k}^{y_k - T(x_k)} p(x) dx = \int_{y_k + T(x_{k+1})}^{x_{k+1}} p(x) dx. \quad (2.8.12)$$

Из уравнения (2.8.12) можно вычислить уровни квантования y_k , согласованные с (2.7.2). Для x_k после дифференцирования (2.8.4) получим

$$p(x_k) (2x_k - y_{k-1} - y_k) - b \int_{y_{k-1} + T(x_k)}^{y_k - T(x_k)} p(x) dx. \quad (2.8.13)$$

Когда $p(x) = \text{const}$, из (2.138) и (2.139) получим:

$$y_k = x_k(1 + b) + x_{k+1}(1 - b) / 2, \quad (2.8.14)$$

$$x_k = y_k(1+b)/2(1+b)^2 + y_{k-1}(1-b)/2(1+b)^2 - ab/(1-b)^2. \quad (2.8.15)$$

Таким образом, полученные аналитические выражения позволяют существенно упростить численные расчеты оптимальных шкал квантования с учетом пороговых свойств зрительного восприятия.

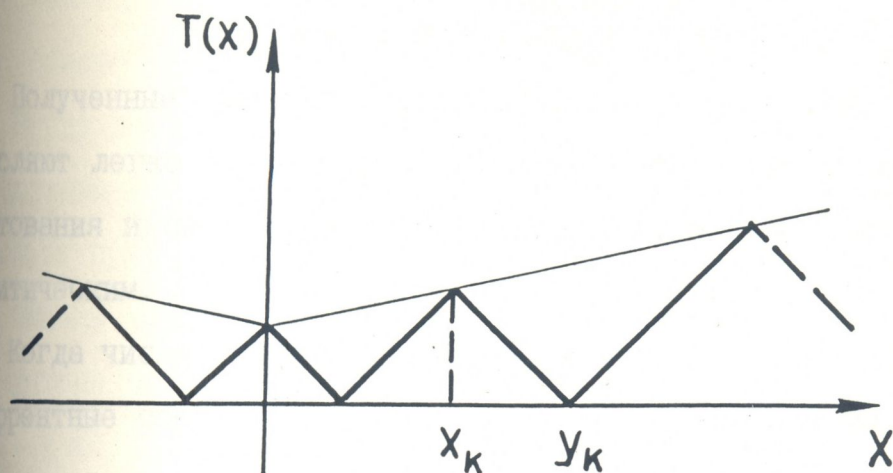
Если функция порога видности $T(x)$ задана графически, пороги и уровни квантования находятся следующим образом [20,72].

Для значения порога $x_1 = 0$ определим уровень квантования y_1 как точку пересечения прямой с наклоном 45° , проведенной из точки $T(0)$ до пересечения с осью абсцис. Точка пересечения определяет значение y_1 (рис.2.8.1а). Для определения порога x_2 из точки $(y_1, 0)$ проводится прямая с наклоном 45° до пересечения с $T(x)$. Точка пересечения определяет значение x_2 . Для нахождения последующих значений x_k и y_k следует повторить приведенную выше процедуру.

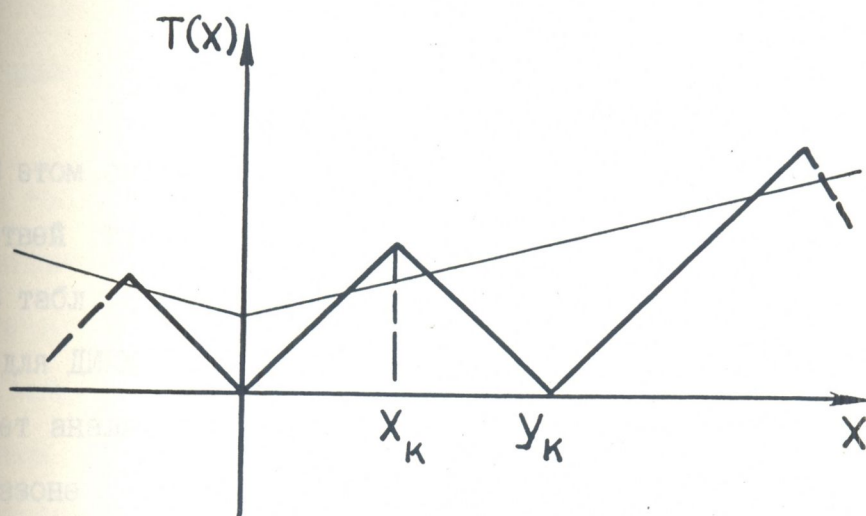
Расчет шкал квантования можно значительно упростить, если вместо графического способа определения порогов и уровней квантования использовать аналитический способ, основанный на рекуррентных соотношениях. Из рис.2.8.1б следует, что $x - y_{k-1} = T(x)$, а при $x=x_k$ получим $x_k - y_{k-1} = T(x_k)$. Учитывая, что $T(x)=a+bx$, имеем:

$$x_k = (a + y_{k-1}) / (1 - b), \quad k = 2, 3, \dots, N = 1. \quad (2.8.16)$$

Когда $x_1 = T(0)$, для нахождения y_k можно записать $y_k - x = T(0)$ при $x = x_{k-1}$:



ა)



ბ)

Рис.2.8.1 Определение параметров оптимизированного квантования для: а - подпорогового критерия оптимальности; б - надпорогового критерия оптимальности

$$y_k = x_k + T(x_k) = x_k(1 - b) + a. \quad (2.8.17)$$

Полученные рекуррентные соотношения (2.8.16) и (2.8.17) позволяют легко вычислить значения оптимальных уровней и порогов квантования и свести графические расчеты параметров квантования к аналитическим.

Когда число уровней квантования нечетно, т.е. когда $y_1 = 0$, рекуррентные соотношения для x_k и y_k принимают вид

$$x_k = (y_k + a) / (1 - b), \quad (2.8.18)$$

$$y_k = x_{k-1} (1 - b) + a. \quad (2.8.19)$$

Как показали экспериментальные исследования [70], пороговая функция видности искажений имеет несимметричный характер и аппроксимируется выражениями

$$\begin{aligned} T(x) &= 3,61 + 0,03x & x > 0, \\ T(x) &= 3,61 + 0,09|x| & x < 0. \end{aligned} \quad (2.8.20)$$

В этом случае расчет x_k и y_k для положительной и отрицательной ветвей $T(x)$ должен производиться отдельно.

В табл. 2.8.1. представлены результаты расчетов шкал квантования для ДИКМ ТВ сигналов на основе (2.8.16) – (2.8.18). Как показывает анализ данных табл. 2.8.1, когда входной сигнал меняется в диапазоне $-255, +255$, число уровней квантования (на основе критерия подпороговой абсолютной ошибки квантования) равно 18 для положительных значений сигнала и 11 – для отрицательных. В этих расчетах значение I -го уровня принято равным $2/256$ с учетом того, что при этом гранулярный шум незаметен на ТВ изображениях.

Нужно отметить, что при квантовании на малое число уровней ($N \leq 8$) степень несимметричности шкал квантования незначительна, и шкалу можно считать симметричной. Представление в табл. 2.8.1 значения x_k и y_k обеспечивают такое квантование ТВ сигнала, при ко-



пором ошибка квантования не превышает порог заметности искажений (т.е. обеспечивает субъективно нулевую ошибку квантования).

Когда допускается существование некоторой ошибки выше пороговой функции $T(x)$ (рис. 2.8.1б), шкалы квантования будут отличаться от приведенных в табл. 2.8.1 (столбец 1.).

Ошибка квантования, которая появляется выше порога, может быть учтена путем умножения пороговой функции $T(x)$ на коэффициент $(1 + \varepsilon)$. Значение ε можно выбрать произвольно. Однако следует отметить, что умножение $T(x)$ на коэффициент $(1 + \varepsilon)$ означает не только допущение появления ошибки выше порога (рис. 2.8.1б), но и изменение углового коэффициента b для $T(x)$, которое определяется экспериментально.

Появление ошибки квантования выше порога может быть учтено выражением

$$(1 + \varepsilon) a + bx.$$

В табл. 2.8.1 (столбец II) представлены результаты расчетов шкал квантования для функции $T(x)$, вычисленной по методике, представленной в [72] и аппроксимированной в виде $T(x) = 1 + 0,1125x$, а в столбцах III, IV — шкалы квантования на основе критерия надпороговой ошибки, выраженной коэффициентами $\varepsilon = 0,3$ и $\varepsilon = 0,7$ соответственно. Анализ данных табл. 2.8.1 показывает, число уровней квантования для подпорогового критерия ошибки равно 30, а для надпорогового критерия ошибки 28 и 26 при $\varepsilon = 0,3$ и $\varepsilon = 0,7$ соответственно.

В работе [145] были измерены $T(x)$ для цветоразностных составляющих полного ТВ сигнала системы СЕКАМ и получены выражения:

для $D_R = -1,9 E_{R-y}$

$$\begin{aligned} T(x) &= 4,5 + 0,1165x & x > 0, \\ T(x) &= 3,5 + 0,0671|x| & x < 0; \end{aligned} \quad (2.8.21)$$

для $D_B = 1,5 E_{B-y}$

$$\begin{aligned} T(x) &= 6,5 + 0,064x & x > 0, \\ T(x) &= 7,25 + 0,1414|x| & x < 0. \end{aligned} \quad (2.8.22)$$

В табл.2.8.2 представлены результаты расчетов шкал квантования с использованием (2.8.21) и (2.8.22). Анализ данных, приведенных в таблицах, показывает, что для кодирования цветоразностных сигналов шкалы квантования асимметричны. При квантовании D_R число уровней квантования 22 (9 для положительной ветви и 13 для отрицательной), а для D_B — 16 (11 для положительной ветви и 6 для отрицательной).

Таблица 2.8.1

Параметры кантования

x_k	y_k	x_k	y_k	x_k	y_k	x_k	y_k	x_k	y_k
-255		31		0		0		0	
	-235		36		1		1		2
-211		41		2		2		4	
	-187		47		3		4		6
-167		52		5		6		8	
	-147		58		6		9		11
-131		62		8		11		14	
	-114		66		10		14		18
-101		74		15		17		22	
	-88		82		15		20		26
-77		83		18		24		31	
	-66		96		22		28		37
-57		103		25		33		43	
	-48		111		29		38		50
-40		119		34		44		58	
	-33		127		39		51		67
-27		135		45		59		77	
	-20		144		51		67		87
-15		153		59		77		100	
	-10		163		66		87		113
-6		173		76		99		129	
	-2		183		86		111		146
0		194		98		127		166	
	2		205		110		143		187
5		216		125		162		212	
	9		228		140		182		238
10		240		158		206		255	
	18		253		177		231		
22		255		201		255			
	27			255					
					225				

Таблица 2.8.2

Параметры квантования

I				II			
D_R				D_b			
x_k	y_k	x_k	y_k	x_k	y_k	x_k	y_k
-255		-7		-225		117	
	-227		-3		-193		131
-209		0		-162		147	
	-192		4		-132		163
-176		9		-109		181	
	-161		14		-87		200
-147		20		-70		220	
	-134		26		-53		241
-122		33		-40		255	
	-111		41		-27		
-100		50		-17			
	-90		59		-7		
-81		71		0			
	-72		83		6		
-64		98		14			
	-57		114		21		
-50		133		29			
	-43		152		38		
-37		176		47			
	-31		200		57		
-26		255		68			
	-21				79		
-16				91			
	-11				103		

2.9 Робастное квантование ТВ изображений при сочетании векторного и скалярного кватований

Как было уже отмечено, если характеристики квантователя рассчитаны для одной статистики и этот квантователь (векторный или скалярный) используется при квантовании сигналов с другой статистикой, то качественные характеристики, процесса квантования, ухудшаются и эффективность кодирования снижается.

При векторном квантовании изображений, создание кодовой книги осуществляется как правило, для ограниченного множества обучающихся векторов. Когда квантуется изображение векторы которого не участвовали в создании кодовой книги, качество восстановленного изображения значительно снижается. Тривиальным способом, улучшения квантованных изображений является увеличение объема кодовой книги, однако, при этом значительно возрастают вычислительные затраты (см.гл.1, раз.1.5), требуемые для осуществления ВК. Уменьшение объема кодовой книги приводит к искажениям, на восстановленных изображениях. Среди них наиболее нежелательными являются: "блочная структура", на участках плавного изменения яркости изображения, "лестничная структура", на границах резких переходов яркости, и "вымывание текстуры".

С точки зрения повышения робастности ВК, целесообразно так преобразовать статистические характеристики квантуемых сигналов, что при квантовании изображений различных сюжетов, статистические характеристики квантуемых векторов менялись бы незначительно. Одним из способов, осуществления такого преобразования, квантуемых сигналов, является метод нормирования. Впервые этот метод был предложен в работе [87]. Однако, в этой работе не были исследованы вопросы сочетания оптимального неравномерного скалярного квантова-

ния с ВК и робастность процесса ВК при таком сочетании.

Как показали экспериментальные исследования [11,87], если вычислить среднее значение исходного блока (вектора) изображения, а затем его вычесть из каждого элемента исходного блока, распределение вероятностей значений вектора приближается к круговой симметрии. Тогда как распределение в исходном блоке, имеет диагональную направленность. Такое преобразование исходного вектора позволяет повысить робастность ВК, так как характер распределения значений вектора блока изображения, будет меняться незначительно от изображения к изображению.

Алгоритм нормированного ВК заключается в следующем. Блок значений исходного изображения, $\mathbf{X}_e = (X_1, X_2 \dots X_k)$ состоит из $k = n \times m$ отсчетов.

Входной вектор квантователя, \mathbf{S}_l , формируется следующим образом:

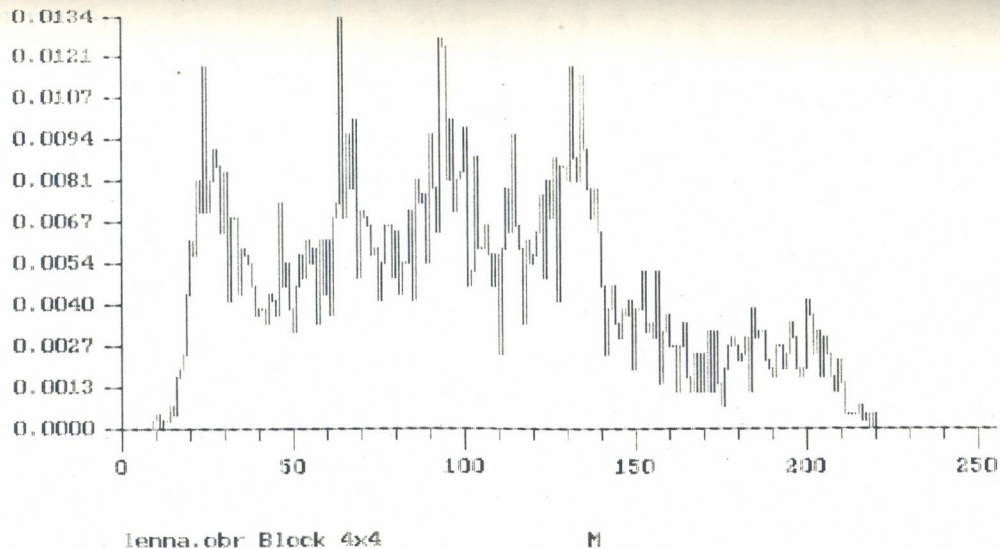
$$m_l = (1/k) \sum_{i=1}^k X_i, \quad (2.9.1)$$

$$\sigma_l = \left[(1/k) \sum_{i=1}^k (X_i - m_l)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.9.2)$$

$$\mathbf{S}_l = (\mathbf{X}_l - m_e) / \sigma_e, \quad (2.9.3)$$

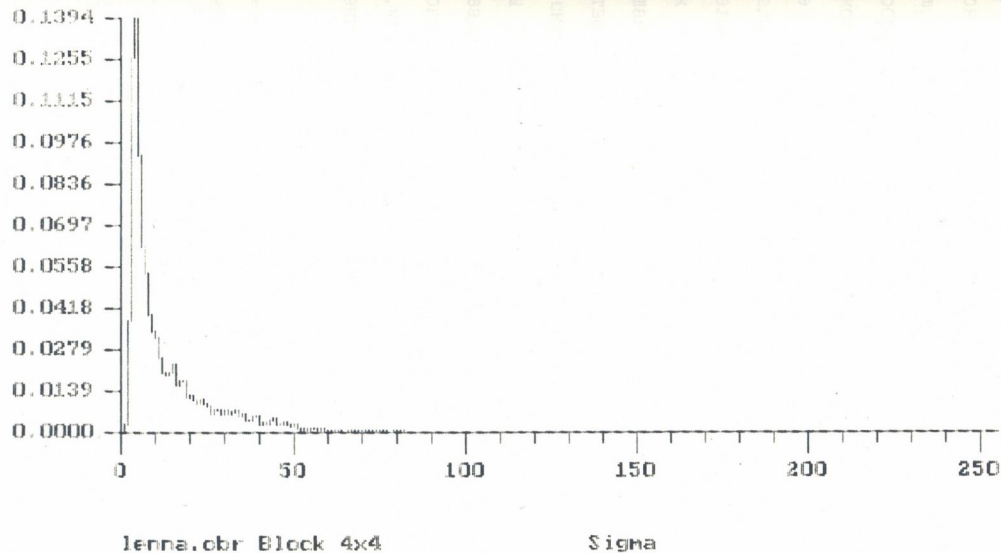
$$\mathbf{X}_l = (X_1, X_2 \dots X_k), \quad (2.9.4)$$

где l номер блока изображения. После такой процедуры, распределение вероятностей $P(\mathbf{S})$, входных векторов \mathbf{S} , будет приблизительно одинаковой для различных изображений [11]. Далее, для векторов \mathbf{S}_l , используется алгоритм ЛБГ, а m_l и σ_l , каждого \mathbf{S}_l , квантуется скалярно, отдельными квантователями. Для оптимального квантования m_l и σ_l были исследованы их распределения вероятностей. На рис. 2.9.1 а и б показаны распределения m_l и σ_l . Анализ этих распределений показал, что среднее значение следует квантовать равномер-



a)

Рис.2.9.I Распределение математического ожидания
для блока 4x4



б)

Рис.2.9.І Распределение среднеквадратического значения
для блока 4x4

ной шкалой, а σ_e – неравномерной шкалой. Экспериментально установлено [11], что при равномерном квантовании m_l , на 32 уровня, и не равномерном оптимальном квантовании σ_l , на 16 уровней, качество восстановленных изображений субъективно не отличается от случая, когда m_l и σ_l квантуются с точностью 8 бит. На рис.2.9.2 представлено изображение восстановленное после векторного квантования, при объеме кодовой книги $N=128$, размерности блока $k = 4 \times 4$, среднее значение m квантовалось на 32 уровня, равномерной шкалой и σ квантовалось на 16 уровней неравномерной шкалой, построенной для распределения Лапласа.

Как было показано в разделе 2.5, при этом обеспечивается наибольшая робастность квантования. В таблице 2.9.1 представлены количественные оценки восстановленных изображений при ВК в сочетании со скалярным квантованием. Там же для сравнения показаны результаты для обычного ВК. Основной мерой искажения была взята среднеквадратическая ошибка (СКО), однако для ускорения вычислений использовался и критерий средней абсолютной ошибки (САО) и минимаксный критерий. Был также использован алгоритм быстрого поиска, предложенный в 1-ой главе диссертации.

Таблица (2.9.1)

Наименование ВК изображений	Количественные оценки восстановленных изображений при векторном квантовании					
	СКО	ПСКО %	НСКО %	ПОСШ дБ	НОСШ дБ	Число бит на элемент бит/эл
LENLBG	136,92	0,20	1,08	26,80	19,63	0,43
SCLLBG	80,89	0,12	0,64	29,08	21,87	0,43
LEN-NDR	96,51	0,14	0,76	28,31	21,15	1,43
SCL-NDR	34,82	0,05	0,27	32,74	25,53	1,43
LN-16-32	106,49	0,16	0,84	27,89	20,72	1,00
SN-16-32	46,04	0,07	0,36	31,53	24,32	1,00

В таблице 2.9.1 использованы следующие обозначения: LENLDG, SCLLBG — тестовые изображения "ЛЕНА" и "ШКОЛА" после векторного квантования на основе алгоритма ЛБГ. LEN-NOR, SCL-NOR, векторное квантование изображения "ЛЕНА" и "ШКОЛА", методом нормирования. LN-16-32 и SN-16-32 — векторное квантование изображения "ЛЕНА" и "ШКОЛА", методами нормирования, при $N = 128$, $k = 4 \times 4$ и σ квантуется с точностью соответственно 5 и 4 бит.

Поскольку, при вышеописанном методе ВК осуществляется раздельное квантование составляющих сигналов изображений, целесообразно оценить, как влияет эта процедура на оптимальность ВК. Оценку будем производить для критерия СКО. Допустим, что кодируется блок источника сигнала как пара (m_i, S_j) , где m_i — среднее значение блока, S_j — кодовый вектор, из кодовой книги C_s . Допустим, что среднее значение $M[S_j]$ не равно нулю, тогда при критерии СКО оптимальный кодер должен найти пару (m, S) , которая минимизирует расстояние

$$\begin{aligned} d(\mathbf{X}, \mathbf{S} + m\bar{\mathbf{1}}) &= [\mathbf{X} - \mathbf{S} - m\bar{\mathbf{1}}]^T [\mathbf{X} - \mathbf{S} - m\bar{\mathbf{1}}] = \\ &= [\mathbf{X}^T \mathbf{X} - 2\mathbf{X}^T \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{S}] + [\mathbf{X}^T \mathbf{X} - 2m \mathbf{X}^T \bar{\mathbf{1}} + m^2 \bar{\mathbf{1}}^T \bar{\mathbf{1}}] - \\ &\quad - \mathbf{X}^T \mathbf{X} = |\mathbf{X} - M[\mathbf{X}] \bar{\mathbf{1}} - \mathbf{S}|^2 + K [M[\mathbf{X}] - \\ &\quad + 2KM [\mathbf{S}] (m - M[\mathbf{X}])] \end{aligned} \quad (2.9.5)$$

Анализ выражения (2.9.5) показывает, что если все кодовые векторы имеют нулевое среднее значение т.е. $M[\mathbf{S}] = 0$, тогда совместного минимума можно достигнуть за счет нахождения двух независимых минимумов. Одного для среднего значения m , и второго, для \mathbf{S} :

$$m = \min^{-1} [M[\mathbf{X}] - m]^2. \quad (2.9.6)$$

$$\mathbf{S} = \min_{\mathbf{S} \in C_s}^{-1} |\mathbf{X} - M[\mathbf{X}] \bar{\mathbf{1}} - \mathbf{S}|^2 = \min_{\mathbf{S} \in C_s}^{-1} |\mathbf{X} - \mathbf{S}|^2. \quad (2.9.7)$$

Такое правило кодирования иллюстрируют два важных аспекта раздельного кодирования. Первый — даст возможность найти локально



Рис. 2.9.2 ТВ изображение после ВК при $N = 128$, $k = 4 \times 4$

оптимальный вектор \mathbf{s} , посредством выбора \mathbf{s} из кодовой книги C_s , который минимизирует СКО между \mathbf{s} и входным вектором источника, $\mathbf{x} - M[\mathbf{x}] \bar{1}$. Если мы применяем алгоритм ЛБГ для создания кодовой книги C_s , и используем вектор источника, с нулевым средним, тогда все кодовые векторы из кодовой книги C_s , будут иметь нулевое среднее значение т.е. $\mathbf{s} = 0$. Средние значения векторов будут равны нулю поскольку при алгоритме ЛБГ, кодовые векторы являются центроидами множества обучающихся векторов и центроиды множества элементов, при критерии СКО, являются средними значениями всех векторов данного множества. Второй аспект заключается в том, что при заданной кодовой книге C_s для нахождения локально оптимального вектора \mathbf{s} нет необходимости вычитания $M[\mathbf{x}] \bar{1}$ из \mathbf{x} , что упрощает практическую реализацию квантователя. В заключение отметим, что k -мерная кодовая книга C_s , при критерии СКО, и раздельном ВК охватывает только $k-1$ размерность. Это происходит из-за того, что все векторы \mathbf{s} находятся внутри гиперплоскости $S_1 + S_2 + \dots + S_k = 0$, где S_i i -ый компонент вектора \mathbf{s} .

Выводы к главе 2

Глава 2 посвящена исследованию оптимизации процесса квантования ТВ сигналов на базе неравномерного квантования при учете как статистических характеристик ТВ изображений, так и особенностей их зрительного восприятия в главе также исследована робастность как одномерного (скалярного квантования), так и его сочетания с многомерным (векторным) квантованием ТВ сигналов.

Новыми результатами, обладающими авторским приоритетом, являются:

1. Исследование эффективности перехода от равномерного квантования к неравномерному на основе нелинейных преобразований квантуемых ТВ сигналов для априори заданных их статистических характеристик и различных видов степеней функции потерь.
2. Исследование эффективности перехода от равномерного скалярного квантования к векторному квантованию.
3. Методика численных и графоаналитических расчетов параметров квантования ТВ изображений на основе критериев минимума средних значений степенных функций потерь.
4. Методика расчета параметров оптимизированного квантования ТВ сигналов, при которой учитываются зрительные пороги заметности специфических искажений квантования.
5. Исследование робастности квантования ТВ сигналов, при сочетании скалярного квантования с векторным квантованием, на основе алгоритма нормированного ВК ТВ изображений.

Результаты исследований, изложенные в данной главе дали возможность:

1. Оценить выигрыши в отношении сигнал-шум квантования при переходе от равномерного квантования к неравномерному на основе предложенных законов компандирования, составляющие 3...6 дБ для

исходных ТВ сигналов и 12 дБ для их разностных значений.

2. Оценить теоретически выигрыш в двоичных единицах при переходе от равномерного скалярного квантования к равномерному векторному квантованию на основе сравнения верхней границы энтропии разности и k -мерного объема ячейки разделения векторного пространства, составляющие 0,255 бит/отсчет.

3. Свести сложные итерационные методы расчета параметров квантования ТВ сигналов, выполняемых с помощью ЭВМ, к относительно простым аналитическим и графическим расчетам, позволяющим сократить время вычислений в 10-15 раз.

4. Установить, что предложенная методика определения параметров квантования ТВ сигналов с учетом зрительных порогов заметности специфических искажений, позволяет значительно упростить процедуру определения параметров квантования на основе предложенных аналитических выражений и рекуррентных соотношений, обеспечивающих более высокую точность по сравнению с существующими графическими методами.

5. Установить, что при распределении вероятностей, принадлежащих классу ограниченных на интервале распределений, робастным является равномерное квантование;

а) Определить, что наибольшая робастность (характеризуемая нечувствительностью отношения сигнал-шум квантования при многомерном увеличении дисперсии квантуемых сигналов) квантование достигается при распределении вероятности значений квантуемых ТВ сигналов, описываемых функцией Гаусса, и параметрах квантования, согласованных с распределением Лапласа. В том случае, когда квантование согласовано по распределению, но не согласованно по дисперсии например, при числе уровней квантования 32, увеличение дисперсии квантуемых сигналов в четыре раза вызывает уменьшение отношения

сигнал-шум на 12 дБ; б) установить, что при сочетании, векторного квантования со скалярным квантованием (на основе раздельного квантования среднего и среднеквадратического значений векторов) не нарушается оптимальность ВК; в) экспериментально установить, что среднее значение вектора следует квантовать равномерной шкалой на 32 уровня, а среднеквадратические значения вектора (с учетом закона распределения вероятностей), неравномерной шкалой на 16 уровней, построенной для распределения Лапласа; г) установить, что сочетание скалярного квантования с ВК обеспечивает робастность процесса векторного квантования ТВ изображений.

Г Л А В А 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ ТВ ИЗОБРАЖЕНИИ

3.1. Задача исследования

Следует отметить, что некоторые аспекты теории и применений векторного квантования различного рода сигналов, в том числе и телевизионных, получили достаточное освещение в литературе (см. например, обзоры работ по ВК, представленные в [81,82]). Однако, что касается исследований по учету особенностей статистических характеристик реальных ТВ изображений при анализе и синтезе процесса ВК, то основываясь на доступных материалах, можно утверждать, что это направление не получило достаточного развития. Можно отметить лишь следующие работы. Так, в [83] предложена процедура векторного квантования, основанная на обновлении кодовой книги в зависимости от локальной статистики подблоков, на которые разбивается исходное ТВ изображение. В [111] предложена также процедура предварительной сегментации исходных ТВ изображений на однородные участки, текстуру и область контуров с последующим кодированием на основе интерполяционного замещения однородных участков и векторного квантования с предсказанием подобластей текстур и контуров. В [151] с целью повышения качественных показателей процесса ВК используется адаптивное, в зависимости от величины среднеквадратического отклонения, изменение размеров блоков элементов ТВ изображения, которые используются при формировании начальной кодовой книги, а с целью улучшения субъективного восприятия ТВ изображений используется так называемая рандомизация процесса ВК (т.е. процедура добавления псевдослучайного шума перед квантованием с последующим его вычитанием при восстановлении). В то же время, представляет существенный интерес исследование влияния особенностей статистических характе-

ристик ТВ изображений и свойств их зрительного восприятия на точностные показатели и субъективное качество восстановленных ТВ изображений в процессе ВК. Следует отметить, что до проведенных автором исследований в литературе отсутствовали данные по влиянию на точностные показатели перехода процесса ВК от ортогональной структуры расположения отсчетов в кадре ТВ изображений к другим структурам, учитывающим анизотропию пространственного спектра реальных ТВ изображений, при различных критериях, используемых при формировании начальной кодовой книги. Не исследовано влияние на точностные показатели процесса ВК статистических характеристик реальных ТВ изображений учитывая как изменение формы блоков, на которые подразделяется ТВ изображение при формировании начальной кодовой книги, так и структуры пространственной дискретизации. Не рассмотрены точностные показатели процесса ВК при сегментации исходных ТВ изображений на блоки ромбовидной формы, отображающей одновременный учет анизотропии пространственного спектра реальных ТВ изображений и их зрительного восприятия.

К настоящему времени разработан ряд методов уменьшения специфических искажений, сопутствующих процессу ВК ТВ изображений. Так, в [112], предлагается так называемый метод перегруппировки, который заключается в повороте вокруг своей оси смежных блоков с целью усиления корреляционных связей между граничными элементами этих блоков. Однако, при практическом применении этого метода, субъективное улучшение качества ТВ изображений имеет место лишь на фрагментах с плавным изменением яркости и, в то же время, происходит сильное "размытие" контуров. Что касается объективных показателей, то например, пиковое отношение сигнал-шум уменьшается в среднем на 6-7 дБ. В [113], для уменьшения специфических искажений ВК предлагается использовать низкочастотную фильтрацию: однако, как показав

ли эксперименты, реализация этого метода сопровождается сильными искажениями контурных областей и понижением четкости ТВ изображения. В [114] была сделана попытка применения рекурсивного блочного кодирования для уменьшения специфических искажений ВК, однако, использование этого метода сопряжено с существенным увеличением времени обработки, вызванный необходимостью проведения большого числа вычислений при реализации двумерного блочного кодирования. Некоторое уменьшение специфических искажений ВК может быть достигнуто применением так называемого метода перекрытия [52], при котором в составлении кодовой книги принимают участие не просто соседние блоки ТВ изображения, а блоки, "перекрывающие" друг друга, примерно на один столбец и на одну строку. Однако, практическое применение этого метода приводит к увеличению избыточности, которая для блока в $N \times N$ элементов пропорциональна $[N/(N - 1)]^2$. Таким образом, как следует из вышеизложенного практическое применение предложенных методов уменьшения специфических искажений ВК не приводит к желаемой степени их уменьшения и, с другой стороны, связана с увеличением либо дополнительной служебной информации, либо объема вычислений.

Как следует из анализа литературы, посвященной уменьшению специфических искажений ВК ТВ изображений, до выполненных автором работ, не были рассмотрены вопросы усиления корреляционных связей на границе соседних блоков при реализации методов "перекрытия блоков"; не была исследована эффективность интерполяционного ВК с точки зрения уменьшения специфических искажений квантования; не было исследовано ВК с переменной точностью квантования, при которой учитывается как зависимость остроты зрения от угла периферийности, так и анизотропия пространственного спектра реальных ТВ изображений и свойств их зрительного восприятия.

Как известно, конечным звеном большинства систем передачи ТВ изображений является зрительная система человека. Поэтому, целесообразно, при создании алгоритмов кодирования ТВ изображений, использовать особенности зрительного восприятия. Это позволяет повысить коэффициент сжатия цифровых ТВ сигналов и тем самым, увеличить эффективность процесса ВК. Учет лишь статистических свойств ТВ сигналов, в настоящее время не позволяет повысить коэффициент сжатия цифровых сигналов выше десяти. Такое ограничение связано с тем фактом, что как правило, точная статистика ТВ сигналов не известна. С другой стороны за последние годы достигнуты значительные успехи в изучении механизмов зрения [152,153], что открыло новые возможности для увеличения коэффициента сжатия цифрового ТВ сигнала.

В предыдущих главах диссертационной работы были исследованы методы ВК, при создании кодовых книг которых не учитывалось свойство зрительного восприятия контуров и текстуры. Учет свойства зрения приводит к созданию отдельных кодовых книг для различных участков ТВ изображения. Такой подход базируется на контурно-текстурной модели ТВ изображения, [89]. Согласно этой модели ТВ изображение можно расчленить на контуры (перепады) и текстуру, окруженную контурами. Несмотря на формальные трудности точного определения этих областей ТВ изображений мы будем в дальнейшем подразумевать под текстурой все то, что не является контуром. Принимая такую модель ТВ изображений и учитывая соответствующие свойства зрительного восприятия этих участков ТВ изображений, возможно для каждой из областей (текстуры и контуров) создавать отдельные кодовые книги и тем самым повысить качество восстановленных ТВ изображений. При таком подходе возможно создавать такое ВК, что искажения в блоках ТВ изображений будут согласованы с "типом" блока

[80]. Каждый блок ТВ изображений можно рассматривать как блок, который генерируется отдельным источником и вырабатывает либо блок с текстурой либо с контуром. Такое ВК можно назвать классифицированным ВК (КВК) [80]. При КВК каждый блок отсчетов ТВ изображения классифицируется в зависимости от того, к какому источнику относится блок, к контурному или к текстурному. Как показали исследования [80,89], искажения квантования наиболее заметны на перепадах ТВ изображений. Для характеристики восстановления контуров можно использовать понятие целостности границ контура, под которой будем понимать такое восстановление контура, когда сохраняется ориентация и местоположение контура. Для того, чтобы сохранить целостность границ контура можно классифицировать блок элементов (т.е. вектор) в зависимости от того, содержит или нет данный блок контур. Если блок содержит контур, то его будем классифицировать по ориентации и местоположению контура в блоке. В этом случае векторы одного класса будут квантоваться кодовыми векторами того же класса. Для осуществления такой процедуры КВК должен содержать классификатор блоков, переключатель и множество векторных квантователей, т.е. отдельные векторные квантователи для каждого класса. При ВК важно сохранить границу контура такой же неразрывной и также очерченной на восстановленном ТВ изображении, как это было в исходном ТВ изображении. Сохранение точного значения градиента около границы контура не так важно, так как глаз реагирует на нормированное значение градиента [80,152]. В то же время угол градиента должен быть сохранен с достаточной точностью, чтобы не появилась разрывность контура и т.н. "лестничная структура". Поэтому входной вектор ВК должен быть классифицирован по ориентации и местоположению контура. Известно так же [56], что за счет эффекта маскирования, вблизи контура, глаз нечувствителен к шумам (с обеих сторон

перепада (контура)), если контур воспроизводится без искажений. Точность КВК зависит как от общего числа кодовых векторов, так и от числа классов и соответственно от числа векторов в каждом классе. Следует отметить, что в существующих, немногочисленных работах по КВК [80,154,155] не достаточно освещены вопросы, касающихся быстродействия алгоритмов КВК для ТВ изображений и количественные данные об уменьшении ошибки квантования по сравнению с обычным ВК. Эти и другие вопросы, касающиеся эффективности КВК ТВ изображений требуют дальнейших исследований.

При ВК последовательности ТВ изображений, наряду с уже отмеченными типами искажений, возникают специфические искажения, связанные с движением и особо раздражающие глаз. Для устранения этих искажений целесообразно использовать пространственно-временную структуру последовательности ТВ изображений путем формирования векторов с трехмерным блоком. В этом случае в качестве третьего измерения используется время [83]. Для построения кодеков видеоконференцсвязи, представляют интерес проведение сравнительного анализа перехода от двумерных блоков к трехмерным и оценка уменьшения искажения типа "муар" при ВК ТВ изображений.

С точки зрения повышения ВК ТВ изображений важное значение имеет как повышение быстродействия и снижение вычислительных затрат, так и использование корреляционных связей между блоками, с целью снижения специфических искажений ВК. В этой связи представляет значительный интерес исследование методов, сочетания векторного квантования с методами, использующими преобразование исходного сигнала. В частности, представляет интерес исследование сочетания ВК с пирамидальным преобразованием Веивлет [34].

Изложению результатов исследования этих вопросов посвящена данная глава.

3.2. Векторное квантование ТВ изображений

при различной геометрии блоков

Практическая реализация классической процедуры ВК, основанно-го на алгоритме ЛБГ, как известно, оперирует неперекрывающимися блоками квадратной формы, состоящими из элементов исходного ТВ изображения. При этом, практически во всех известных работах, посвященных ВК [80-83], используются ортогональные структуры дискретизации, т.е. структуры расположения отсчетов на плоскости ТВ изображения, образующие двумерную ортогональную решетку. Однако, как известно [46,47], анизотропность частотно-пространственного спектра реальных ТВ изображений, а также пространственно-частотных характеристик зрения, приводит к более эффективным структурам дискретизации, в частности к таким, при которых отсчеты располагаются на плоскости кадра в шахматном порядке. В этой связи существенный интерес представляет исследование влияния других структур дискретизации, в частности, шахматной структуры в кадре [157] на точностные показатели процесса ВК.

Эффективность перехода при ВК от ортогональной структуры дискретизации к шахматной была оценена на примере тестовых изображений, представленных на рис.3.2.1, с числом отсчетов ТВ изображения по горизонтали соответственно 256x256 при прогрессивной развертке и исходном числе дв.ед. на отсчет равным 8. В качестве точностных показателей были использованы:

- пиковая среднеквадратическая ошибка:

$$\sigma_{\Pi}^2 = \frac{1}{255^2 N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 ; \quad (3.2.1)$$

- нормированная среднеквадратическая ошибка:

$$\sigma_{\Pi}^2 = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^N x_i^2 ; \quad (3.2.2)$$

- пиковое отношение сигнал-шум

$$\gamma_1 = -10 \lg \sigma_{\pi}^2 ;$$

- нормированное отношение сигнал-шум

$$\gamma_2 = -10 \lg \sigma_{\pi}^2 ; \quad (3.2.4)$$

где x_i, y_i - элементы исходного и восстановленного после ВК ТВ изображений соответственно.

В таблице 3.2.1 приведены результаты расчета по выражениям 3.2.1.-3.2.4. точностных показателей процессов ВК, полученных путем моделирования этого процесса на основе алгоритма ЛБГ для ТВ изображения "ЛЕНА", при числе кодовых векторов $L = 128$ и размерности вектора $k = 4 \times 4$, при этом кодовая книга формировалась как на основе критерия минимума СКО, с использованием выражения 1.6.5, так и критерия минимакса (выражение 1.6.7).

Как следует из данных таблицы 3.2.1 точностные показатели процесса ВК, независимо от структуры дискретизации, при формировании кодовой книги на основе критерия минимума СКО выше, чем при использовании критерия минимакса, однако время обработки (вычислительные затраты) в последнем случае меньше, чем при использовании критерия минимума СКО (см. раздел 1.6). В то же время следует отметить, что переход от ортогональной структуры дискретизации к шахматной приводит к снижению точностных показателей процесса ВК в среднем на 2 дБ, при одновременном уменьшении вдвое числа дв.ед., приходящихся на элемент исходных ТВ изображений.

Таблица 3.2.1

Критерии	Ортогональная структура				Шахматная структура			
	$\sigma_{\pi}^2 (\%)$	$\sigma_{\pi}^2 (\%)$	$\gamma_1 (\text{дБ})$	$\gamma_2 (\text{дБ})$	$\sigma_{\pi}^2 (\%)$	$\sigma_{\pi}^2 (\%)$	$\gamma_1 (\text{дБ})$	$\gamma_2 (\text{дБ})$
Минимум СКО	0,22	1,12	26,63	19,50	0,33	1,71	24,80	17,68
Минимакса	0,28	1,46	25,50	18,37	0,39	2,03	24,05	16,92



Рис. 3.2.1 Тестовые ТВ изображения

Для наглядной иллюстрации вышеизложенного на рис.3.2.2 - 3.2.5 приведены разностные изображения восстановления (разности между исходным и восстановленным после ВК ТВ изображений), а также гистограммы ошибок восстановления для отдельных фрагментов ТВ кадра при применении ортогональной (рис.3.2.2 и рис.3.2.4) и шахматной (рис.3.2.3 и 3.2.5) структур дискретизации соответственно. При этом кодовая книга формировалась на основе критерия минимума СКО.

Как уже отмечалось, в большинстве работ по ВК ТВ изображений при формировании кодовой книги на основе алгоритма ЛБГ, используются блоки квадратной формы. Отмечалось, также, что анизотропия пространственного спектра ТВ изображений позволяет реализовать эффективные структуры дискретизации с плотной упаковкой основного и побочного спектров, возникающих в процессе дискретизации. С этой точки зрения, представляет существенный интерес исследование влияния анизотропии статистических характеристик реальных ТВ изображений, на точностные показатели процесса ВК учитывая изменение как формы блоков, так и структуру пространственной дискретизации.

Для установления влияния размерности и формы блоков (векторов) на качественные показатели ТВ изображений, подвергнутых ВК было проведено моделирование процесса ВК с использованием прямоугольных блоков различной размерности $k = m \times n$, где m - обозначает вертикальный размер блока, а n - горизонтальный. Размер кодовой книги был подобран равным $L = 128$. Выбор начальной кодовой книги производился на основе алгоритма, предложенного в первой главе диссертации, который исключал возможность повторения одних и тех же векторов (что возможно при случайном отборе) при заполнении исходной кодовой книги. Основной мерой искажений был взят минимум СКО, однако иногда для ускорения вычислений использовался и критерий минимума САО. Оценка качественных показателей восстановленных



3.3.2.2 Разностное изображение при ВК с ортогональной структурой дискретизации, $k=4 \times 4$, $L=128$, $R=0,43$ дв.ед./эл.



3.3.2.3. Разностное изображение при ВК с шахматной структурой дискретизации, $k=4 \times 4$, $L=128$, $R=0,22$ дв.ед./эл.

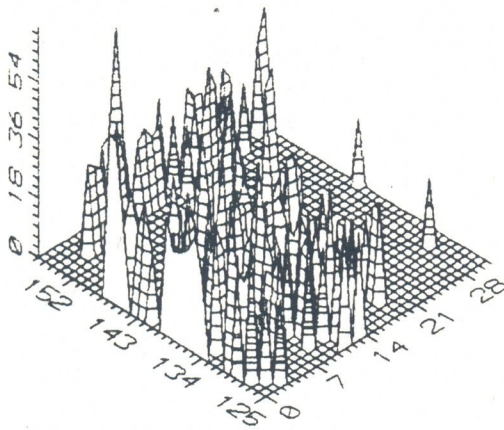


Рис.3.2.4. Гистограмма ошибок ВК с ортогональной структурой дискретизации, $k=4 \times 4$, $L=128$, $R=0,43$ дв.ед./эл.

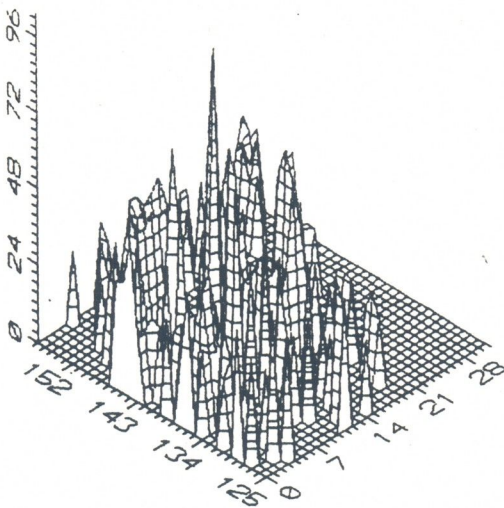


Рис.3.2.5. Гистограмма ошибок ВК с шахматной структурой дискретизации, $k=4 \times 4$, $L=128$, $R=0,43$ дв.ед./эл.

ТВ изображений, проводилась на основе выражений (3.2.3) и (3.2.4). В начале были использованы прямоугольные блоки. Как показали результаты моделирования, для одного типа ТВ изображений (в том числе и "ЛЕНА"), прямоугольные блоки с большим вертикальным размером имеют преимущества перед блоками с большим горизонтальным размером, а для другого типа ТВ изображений (в том числе и "ШКОЛА") прямоугольные блоки с большим горизонтальным размером имеют преимущество перед блоками с большим вертикальным размером. Так, в частности, при $L = 128$ блоки с $k = 8 \times 2$ восстанавливают тестовое ТВ изображение "ЛЕНА" лучше (при этом обеспечивается $\gamma_1 = 26,53$ дБ), чем блоки с $k = 2 \times 8$ (при этом $\gamma_1 = 25,50$ дБ), а "ШКОЛА" хуже (при этом обеспечивается $\gamma_1 = 28,11$ дБ), чем блоки с $k = 2 \times 8$ (при этом $\gamma_1 = 28,81$ дБ), несмотря на одинаковое число дв.ед., приходящихся на элемент ТВ изображения. На рис.3.2.6 и рис.3.2.7 представлены разностные изображения восстановления для ТВ изображения "ЛЕНА", а на рис. 3.2.8 и рис.3.2.9 гистограммы ошибок восстановления при использовании блоков размерности 8×2 (рис.3.2.6а...рис.3.2.9а) и 2×8 (рис.3.2.6б ... рис.3.2.9б) для $L = 128$ и, следовательно, $R = 0,43$ бит/эл. соответственно при использовании ортогональной (рис.3.2.6 и рис.3.2.8) и шахматной (рис.3.2.7 и рис.3.2.9) структур дискретизации.

Далее в процессе ВК были использованы блоки, имеющие форму параллелограммов, приведенных на рис. 3.2.10 при $k = 16$. Как показали результаты моделирования, при ВК ТВ изображений блоками такой формы γ_1 (также как и γ_2) примерно на 1-1,5 дБ ниже по сравнению с тем случаем, когда используются прямоугольные блоки той же размерности. Что касается одновременного перехода, в этом случае, от ортогональной к шахматной структурам дискретизации, то эффективность перехода получается такой же, как и в случае блоков квад-

ратной формы. На рис.3.2.11 и рис.3.2.12 представлены разностные изображения восстановления, а на рис.3.2.13 и рис.3.2.14 гистограммы ошибок восстановления при использовании блоков, имеющих форму, приведенную на рис.3.2.10 для $L=128$, $k=16$ и $R=0,43$ бит/эл. соответственно при использовании ортогональной (рис.3.2.11 и рис.3.2.13) и шахматной (рис.3.2.12 и рис.3.2.14) структур дискретизации.

Анализ полученных результатов показывает, что при одной и той же размерности блоков ТВ изображения, восстановленные после ВК, базирующегося на использовании квадратных блоков, дают γ_1 и γ_2 на 1-1,5 дБ выше, чем при использовании прямоугольных блоков в процессе формирования кодовой книги. Что касается перехода от ортогональной структуры дискретизации к шахматной структуре в кадре, то при таком переходе отношение сигнал-шум ухудшается в среднем на 2 дБ. Однако, число дв.ед. на элемент ТВ изображения уменьшается в этом случае вдвое.



а)



б)

3.2.6 Разностные изображения при ВК с ортогональной структурой дискретизации, $L=128$, $R=0,43$ дв.ед./эл., а) $k=8 \times 2$, б) $k=2 \times 8$

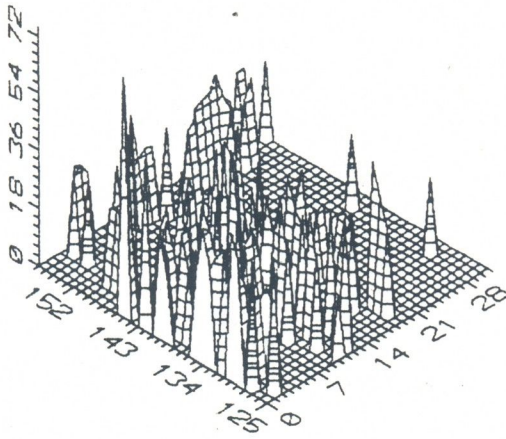


ա)

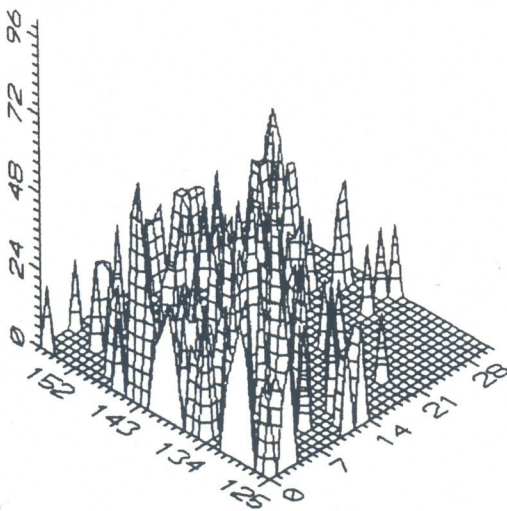


б)

3.2.7. Разностные изображения при ВК с шахматной структурой дискретизации, $L=128$, $R=0,43$ дв.ед./эл., а) $k=8 \times 2$, б) $k=2 \times 8$

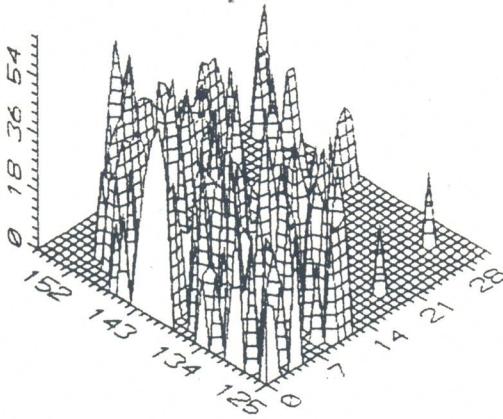


a)

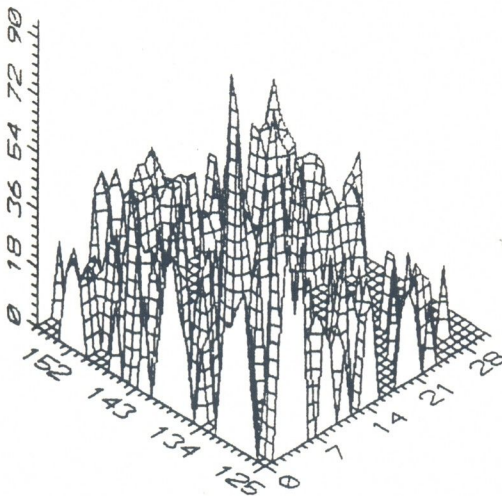


b)

3.3.2.8 Гистограммы ошибок ВК с ортогональной структурой дискретизации, $L=128$, $R=0,43$ дв.ед./эл., $a)k=8 \times 2$, $b)k=2 \times 8$



a)



b)

3.2.9 Гистограммы ошибок ВК с шахматной структурой дискретизации,
L=128, R=0,43 дв.ед./9л., а) k=8x2, б) k=2x8

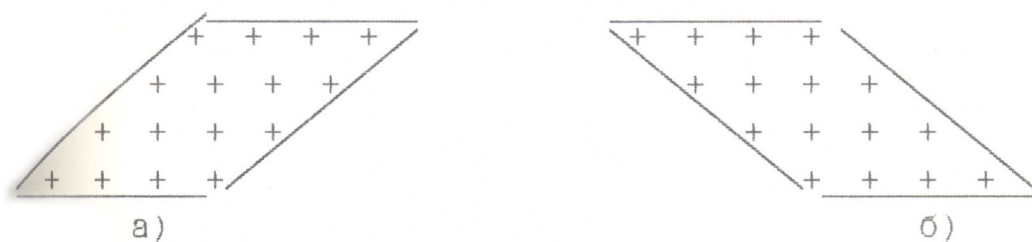


Рис. 3.2.10 Параллелограмная форма блоков
с наклоном а) 45° и б) 135°



а)



б)

Рис.3.2.II. Разностные изображения при ВК с параллелограммной формой блоков и ортогональной структурой дискретизации с наклоном а) 45° и б) 135°

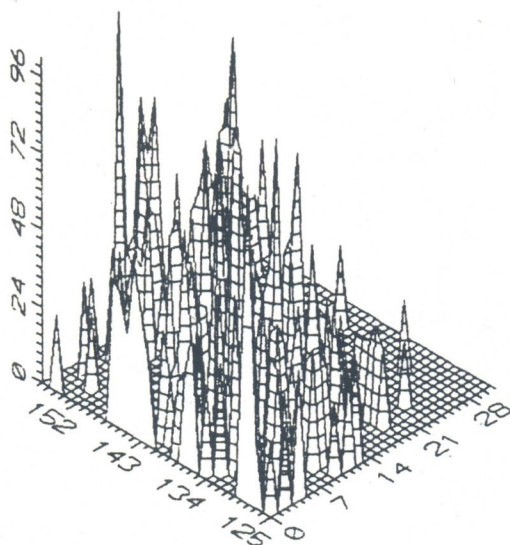


ა)

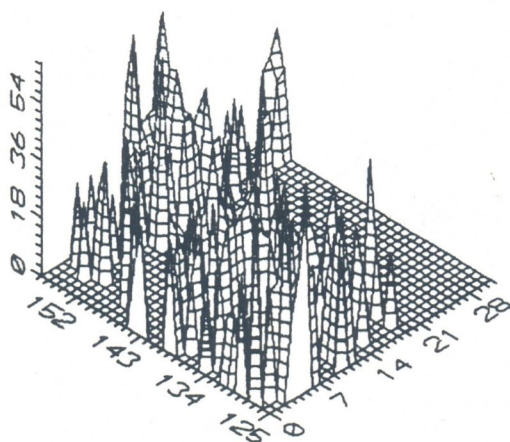


ბ)

Рис.3.2.12 Разностные изображения при ВК с параллелограммной формой блоков и шахматной структурой дискретизации с наклоном а) 45° и б) 135°

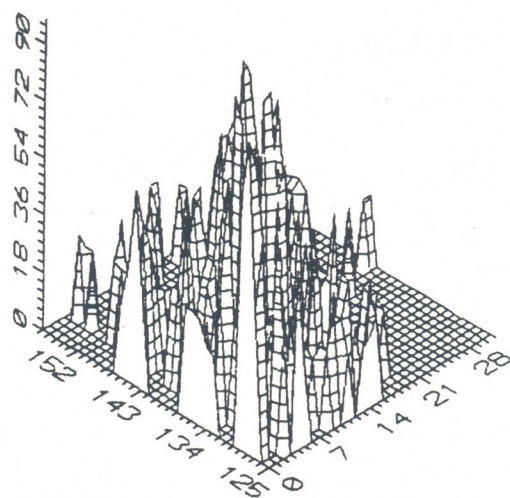


ა)

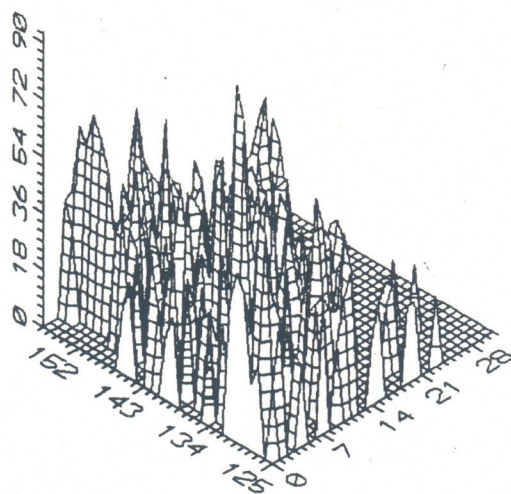


ბ)

რის. 3.2.13 Гистограммы ошибок ВК с параллелограммной формой
блоков и ортогональной структурой дискретизации
с наклоном а) 45° и б) 135°



ա)



б)

Рис.3.2.14 Гистограммы ошибок ВК с параллелограммной формой
блоков и шахматной структурой дискретизации
с наклоном а) 45° и б) 135°

3.3 Векторное квантование с учетом статистических особенностей ТВ изображений и их зрительного восприятия

Выше, анизотропия частотно-пространственного спектра реальных ТВ изображений и пространственно-частотных характеристик зрения, применительно к ВК, была учтена в этапе выбора оптимальных структур дискретизации и их влияния на точностные показатели процесса ВК. Кроме того, было исследовано влияние отличия формы блоков, на которые подразделяются исходные ТВ изображения с целью формирования начальной кодовой книги, от квадратной на точностные показатели процесса ВК. В тоже время известно [46,156], что изолинии, характеризующие форму рельефа над плоскостью пространственных частот, отображающего энергетический спектр реальных ТВ изображений, существенно отличаются от концентрических окружностей и скорее всего напоминают ромб, оси симметрии которого совпадают с осями частотной плоскости. Степень асимметрии при этом определяется отношением минимальной ширины полосы пространственных частот к максимальной, и как показывают исследования [158], это отношение равно 0,14. Ниже представлены результаты исследования точностных показателей процесса ВК при одновременном учете анизотропии пространственного спектра реальных ТВ изображений и свойств их зрительного восприятия, т.е. при аппроксимации пространственно-частотного спектра ТВ изображений и частотно-пространственных характеристик зрения геометрической фигурой, имеющей форму ромба. При ВК последнее учитывается путем сегментации исходных ТВ изображений на ромбовидные блоки с последующим их использованием при формировании кодовой книги. На рис.3.3.1 и рис.3.3.2 приведены разностные изображения восстановления и гистограммы ошибок восстановления тестового ТВ изображения, подвергнутого ВК при ромбовидной форме бло-

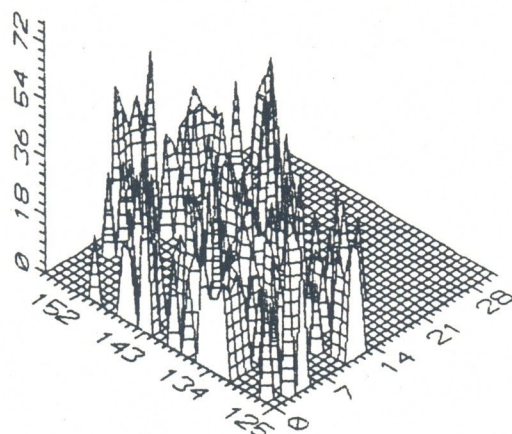


a)

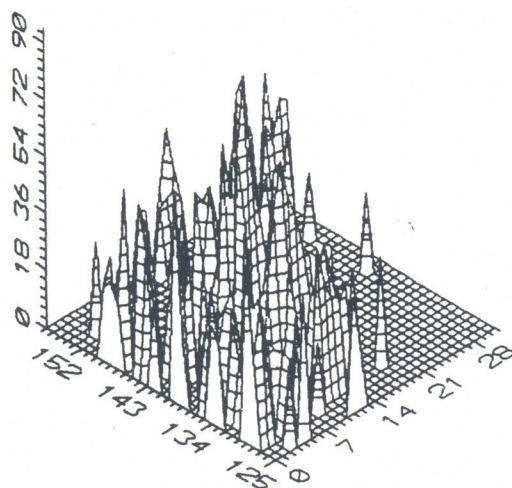


б)

рис.3.3.1 Разностные изображения при ВК с ромбовидными блоками при
а) ортогональной и б) шахматной структуре дискретизации



ა)



ბ)

Рис.3.3.2 Гистограммы ошибок при БК с а)ортогональной и б)шахматной структурой дискретизации

ков. При этом рис.3.3.1 соответствует использованию ортогональной, а рис.3.3.2 – шахматной структур дискретизации. Для сравнительной оценки эффективности перехода к ромбовидной форме блоков в табл.3.3.1 и табл.3.3.2 сведены данные о точностных показателях процесса ВК тестового ТВ изображения, полученные как в этом, так и в предыдущих разделах. При этом табл 3.3.1 соответствует применению ортогональной, а табл.3.3.2 – шахматной структуры дискретизации. Как следует из данных табл.3.3.1 и табл.3.3.2 переход к ромбовидным блокам при формировании кодовой книги обеспечивает улучшение точностных показателей процесса ВК по сравнению со всеми другими формами блоков. Так, например, по сравнению с прямоугольной формой блоков выигрыш в отношении сигнал-шум составляет в среднем 0,4 дБ, а по сравнению с блоками, имеющими форму параллелограмма – 1,5 дБ. Следует также отметить, что переход к шахматной структуре дискретизации приводит к снижению точностных показателей процесса ВК в этом случае в среднем на 1,5 дБ, однако число дв.ед., приходящих на элемент ТВ изображения при этом уменьшается вдвое.

Таблица 3.3.1

Форма блока	Число эл-ов в блоке	Число дв.ед./эл	$\sigma_n^2(\%)$	$\sigma_p^2(\%)$	$\gamma_2(\text{дБ})$	$\gamma_1(\text{дБ})$
Квадрат	4x4=16	0,44	1,12	0,22	19,50	26,63
Прямоугольн.	8x2=16	0,44	1,15	0,22	19,39	26,52
Прямоугольн.	2x8=16	0,44	1,46	0,28	18,37	25,50
Параллелогр. 45°	4x4=16	0,44	1,89	0,36	17,24	24,37
Параллелогр. 135°	4x4=16	0,44	1,75	0,34	17,56	24,69
Ромб	13	0,58	1,07	0,21	19,72	26,85

Таблица 3.3.2

Форма блока	Число эл-ов в блоке	Число дв.ед./эл	$\sigma_n^2(\%)$	$\sigma_p^2(\%)$	$\gamma_2(\text{дБ})$	$\gamma_1(\text{дБ})$
Квадрат	4x4=16	0,22	1,71	0,33	17,67	24,80
Прямоугольн.	8x2=16	0,22	1,51	0,31	18,02	25,15
Параллелогр. 45°	2x8=16	0,22	2,13	0,41	16,72	23,85
Параллелогр. 135°	4x4=16	0,22	1,94	0,37	17,13	24,26
Ромб	13	0,29	1,69	0,33	17,73	24,86

3.3.1 Исследование методов усиления корреляционных связей на границе соседних блоков

Как уже отмечалось выше, одним из способов уменьшения специфических искажений векторного квантования ТВ изображений является т.н. метод перекрытия блоков [27,154]. Суть метода состоит в том, что в составлении кодовой книги принимают участие не просто соседние блоки, на которые подразделяется исходное ТВ изображение, а блоки, "перекрывающие" друг друга на один столбец (в вертикальном направлении) и одну строку (в горизонтальном направлении), в результате которого усиливаются корреляционные связи на границе соседних блоков. Возможен вариант и с перекрытием нескольких столбцов или строк. Принцип перекрытия блоков иллюстрируется на рис.3.3.3. Далее, на основе сформированных таким образом блоков по алгоритму ЛБГ (или его модификации), создается кодовая книга, которой и осуществляется квантование исходного ТВ изображения. Что касается процесса восстановления ТВ изображений, подвергнутого векторному квантованию с использованием кодовой книги, сформированной на основе перекрывающихся блоков, то возможны три следующих варианта:

а - восстановление путем непосредственного сопряжения блоков, выбираемых из кодовой книги по принятому индексу (рис.3.3.4а);

б - восстановление блоками, перекрывающимися по столбцам и строкам, как и на передающем конце, когда подразделяется исходное ТВ изображение (рис.3.3.4б);

в - восстановление блоками, перекрывающими столбцы и строки, сформированные путем интерполяции на основе элементов соседних блоков (рис.3.3.4в).

+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+

Рис.3.3.3 Блоки с перекрытием

Результаты моделирования рассмотренных выше вариантов восстановления ТВ изображений представлены на рис.3.3.5. При этом на рис.3.3.5а приведен фрагмент исходного ТВ изображения, а на рис.3.3.5б результат его векторного квантования на основе обычного алгоритма ЛБГ. На последнем рисунке четко видны все типы специфических искажений, сопутствующих процессу ВК. Рис.3.3.5в,г,д иллюстрируют результаты моделирования рассмотренных выше методов восстановления ТВ изображений, подвергнутых ВК с перекрытием блоков (варианты (а),(б),(в)). Как следует из этих рисунков наилучшие субъективные результаты соответствуют случаю восстановления ТВ изображений на основе блоков, перекрывающих столбцы и строки, сформированные путем интерполяции на основе элементов, принадлежащих к соседним блокам (вариант (в)). На рис.3.3.6 а,б,в приведены данные (изображения и гистограммы ошибок восстановления), позволяющие качественно судить об эффективности предложенных выше методов (вариант (а), (б),(в) соответственно) восстановления ТВ изображений, подтверждающих сделанное выше заключение об эффективности варианта (в).

+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+

ა) Прямое сопряжение

+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+

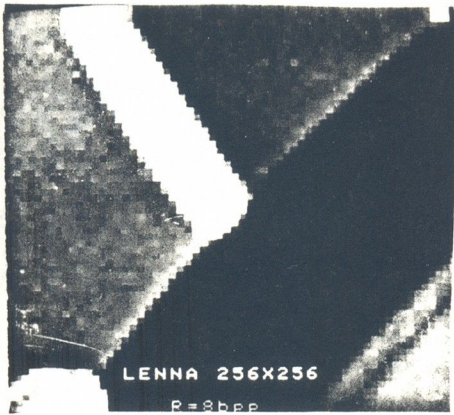
ბ) Прямое перекрытие

+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+

ვ) Перекрытие с интер-
поляцией

Рис.3.3.4 Процесс восстановления блоков

К методам уменьшения специфических искажений векторного квантования ТВ изображений может быть отнесено так называемое интерполяционное векторное квантование, суть которого заключается в следующем. На основе элементов А,Б,В,Г, (рис.3.3.7) соседних блоков 1,2,3 и 4, из числа блоков на которые подразделяется исходное ТВ изображение, производится интерполяция всех других элементов блока 4. Далее, из истинных значений элементов блока 4 вычитаются их интерполяционные значения и полученный массив разностей подвергается векторному квантованию на основе алгоритма ЛБГ. Что касается элементов А,Б,В,Г, то последние квантуются скалярно и передаются вместе с индексом кодовой книги. На приемной стороне, по принятым элементам А,Б,В и Г вновь интерполируются элементы блока 4, к которым прибавляются принятые векторно-квантованные разности. Таким образом, производится восстановление элементов блока 4 на приемной стороне. Результаты моделирования интерполяционного векторного квантования фрагмента тестового ТВ изображения приведены на рис.3.3.8. Сопоставление данных рис.3.3.5. и рис.3.3.8 указыва-



ա) Исходная часть



б) при обычном ВК



в) прямое сопряжение

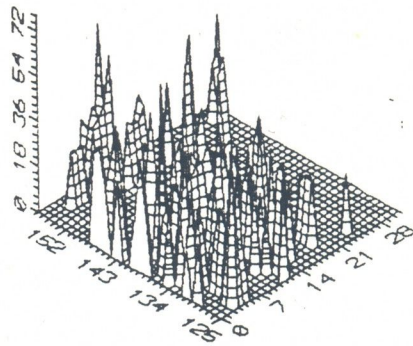
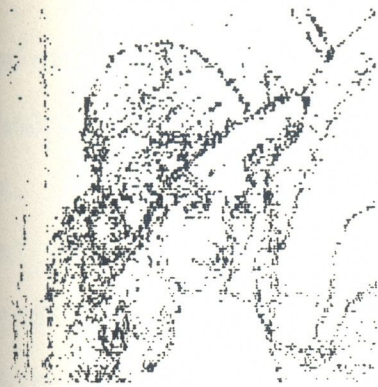


г) прямое перекрытие

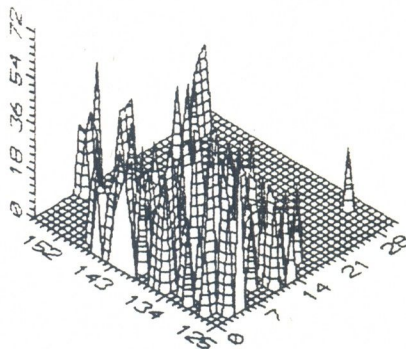


д) с интерполяцией

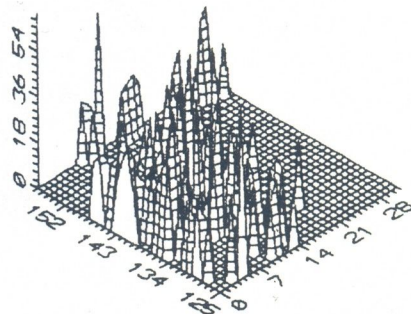
Рис.3.3.5 Сравнительные результаты ВК при восстановлении контурной части ТВ изображения



а)



б)



в)

3.3.3.6 Разностные изображения и гистограммы ошибок БК с а) прямым сопряжением, б) прямым перекрытием и в) интерполяцией

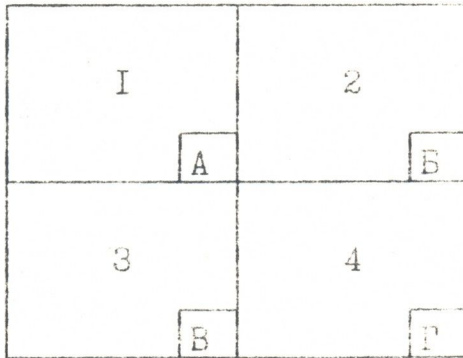


Рис.3.3.7 Схема интерполяции



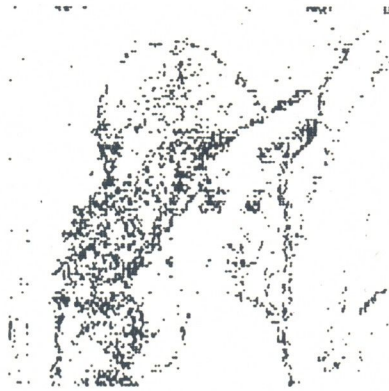
Рис.3.3.8 Контурная часть при интерполяционном ВК

ет на существенное уменьшение специфических искажений квантования ТВ изображений при применении интерполяционного векторного квантования. Данное утверждение подтверждается так же сравнением приведенных на рис.3.3.9 а,б изображения и гistogramмы ошибок восстановления, при применении интерполяционного векторного квантования, с соответствующими данными, представленными на рис.3.3.6.

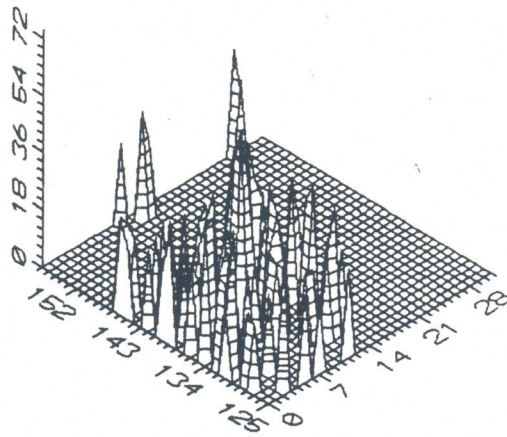
В табл.3.3.3 приведены точностные показатели, характеризующие эффективность интерполяционного векторного квантования и рассмотренных выше методов восстановления ТВ изображений, подвергнутых ВК. Как следует из данных, приведенных в таблице 3.3.3, точностные показатели интерполяционного ВК в среднем на 1 дБ выше по сравнению с другими, рассмотренными выше методами уменьшения специфических искажений, сопутствующих процессу векторного квантования ТВ изображений.

Таблица 3.3.3.

Варианты	Число дв.ед./эл.	Точностные показатели			
		$\sigma_{\Pi}^2 (\%)$	$\sigma_{\Pi}^2 (\%)$	$\gamma_1, \text{дБ}$	$\gamma_1, \text{дБ}$
а	0,44	0,25	1,28	18,93	26,06
б	0,77	0,21	1,09	19,61	26,74
в	0,77	0,17	0,89	20,49	27,62
Интерполя- ционное ВК	0,93	0,18	0,95	20,20	27,33



а)



б)

Рис.3.3.9 Разностное изображение и гистограмма
ошибок интерполяционного ВК

3.4 Векторное квантование ТВ изображений с переменной точностью квантования

Одним из методов уменьшения специфических искажений квантования, сопутствующих процессу векторного квантования, является т.н. ВК с переменной точностью квантования, базирующееся на следующем свойстве зрения. Как известно, по мере удаления от зрительной оси, проходящей от фовеа через центр хрусталика к объекту наблюдения, острота зрения резко падает. На рис.3.4.1 приведена, заимствованная из [159], кривая зависимости относительной остроты зрения ν от угла периферийности θ , отсчитываемого от зрительной оси. Данное свойство зрительной системы положено в основу следующего алгоритма векторного квантования [25,32].

Исходное ТВ изображение подразделяется на две области – центральную и периферийную и ВК для этих областей реализуется с различной точностью. В качестве примера, из приведенного на рис.3.4.2 исходного тестового ТВ изображения выделена центральная область (обведенная пунктиром), состоящая из 160×160 элементов, а расположение вне этой области элементы ТВ изображения отнесены к периферийной области. Далее, центральная область делится на блоки, размером 4×4 элемента, используемые для формирования кодовой книги, которая в данном случае состоит из 96 кодовых векторов. Что касается периферийной области, то она подразделяется на блоки по 8×8 элементов и число векторов в кодовой книге равно 32. Таким образом, центральная область ТВ изображения закодируется с более высокой точностью, чем периферийная. Некоторые точностные показатели результатов моделирования предложенного алгоритма ВК для тестового ТВ изображения "ЛЕНА" представлены на рис.3.4.3–3.4.4 в виде изоб-

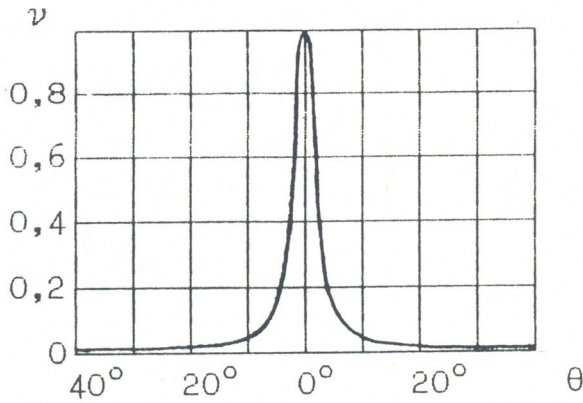
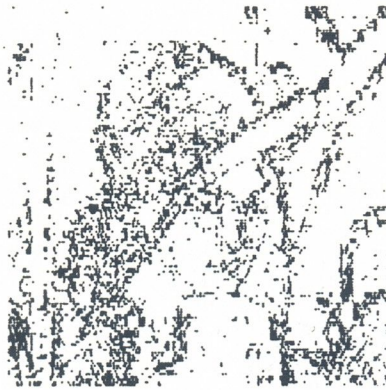


Рис.3.4.1 Зависимость относительной остроты зрения ν от угла периферийности θ



Рис.3.4.2 Центральная область (пунктиром) ТВ изображения

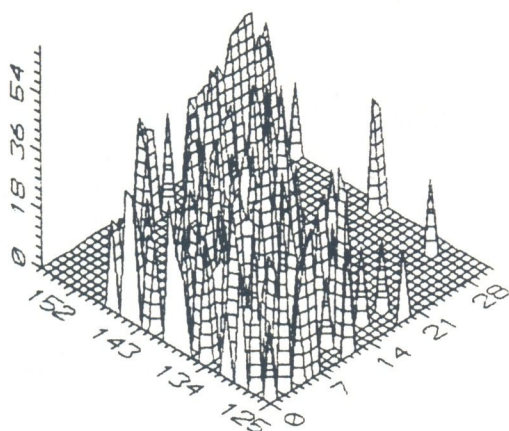


а)

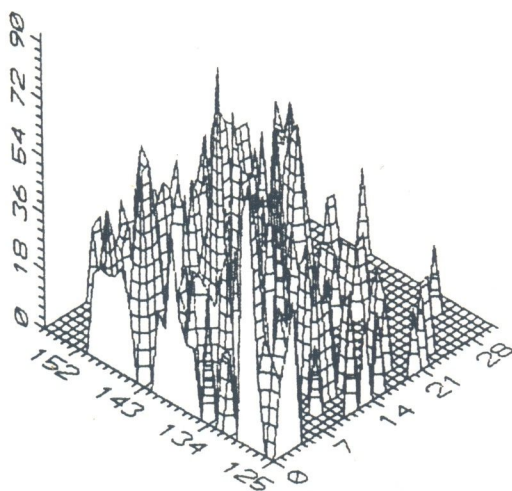


б)

Рис.3.4.3 Разностные изображения при ВК с разными размерами блоков
а) ортогональной и б) шахматной структуры дискретизации



ა)



ბ)

3.3.4.4. Гистограммы ошибок ВК с разными размерами блоков при

а) ортогональной и б) шахматной структуре дискретизации

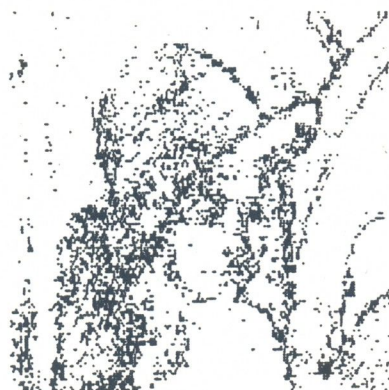
ражений и гистограмм ошибок восстановления соответственно. При этом рис.3.4.3а и рис.3.4.4а соответствуют случаю использования ортогональной структуры дискретизации, а рис.3.4.3б и рис.3.4.4б - шахматной структуры.

Были рассмотрены и некоторые другие варианты предложенного метода векторного квантования ТВ изображений. В частности, была исследована процедура ВК, при которой кодовая книга формируется на основе элементов только центральной области ТВ изображения. Последняя была подразделена на блоки по 4x4 элемента, а точность формирования кодовой книги, содержащей 128 кодовых векторов, была повышена на порядок по сравнению с предыдущим случаем, т.е., при создании кодовой книги, порог итерации, определяющий "близость" кодовых векторов к исходным, был принят равным 0,01% взамен 0,1%, используемого выше. Рис.3.4.5 и рис.3.4.6 иллюстрируют результаты моделирования процедуры ВК тестового ТВ изображения при использовании кодовой книги, сформированной по элементам центральной области ТВ изображения, как для ВК центральной области, так и для периферийной. При этом, рис.3.4.5а и рис.3.4.6а соответствуют случаям использования ортогональной структуры дискретизации, а рис.3.4.5б и рис.3.4.6б - шахматной.

Была исследована также модификация ВК, при которой для центральной и периферийной областей используются различные кодовые книги, однако, размер блоков, на которые подразделяется исходное ТВ изображение, принят одинаковым. На рис.3.4.7 и рис.3.4.8 приведены результаты моделирования предложенной модификации ВК при выборе размеров блоков для центральной и периферийной областей равных 4x4 элемента. При этом число кодовых векторов в кодовой книге центральной области равно 96, а периферийной - 32. Данные на рис.3.4.7а и рис.3.4.8а соответствуют случаям, когда используется

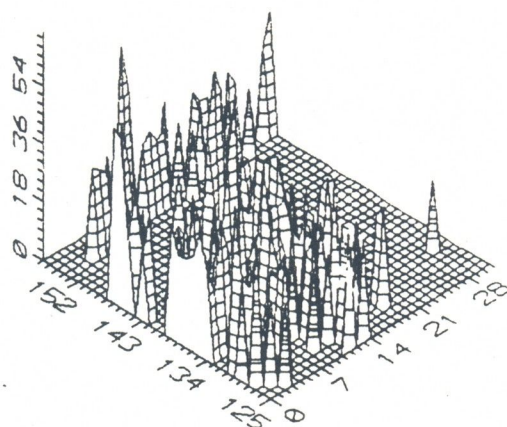


ა)

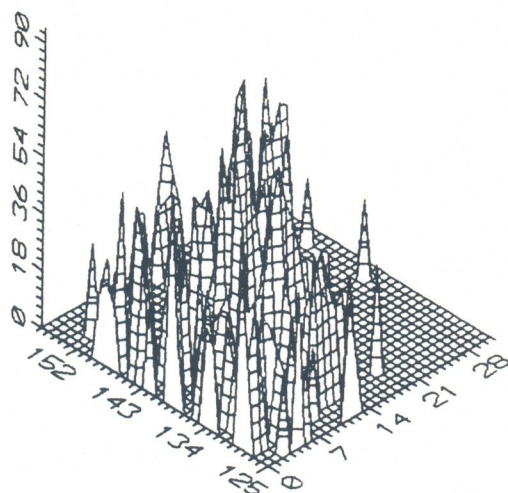


ბ)

3.4.5 Разностные изображения при погрешности кодовой книги
равной 0,01% в центральной области ТВ изображения при
а) ортогональной и б) шахматной структурах дискретизации



а)



б)

3.4.6 Гистограммы ошибок при погрешности кодовой книги равной 0,01% в центральной области ТВ изображения при а) ортогональной и б) шахматной структурах дискретизации

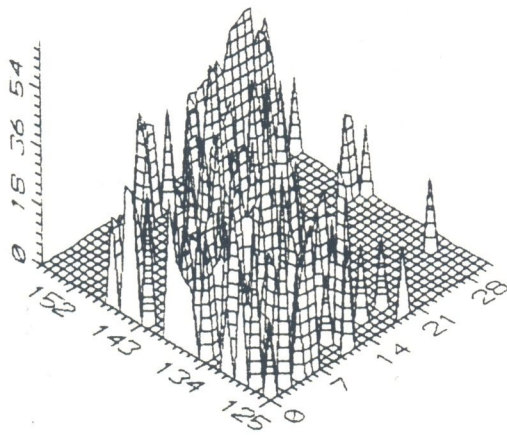


ა)

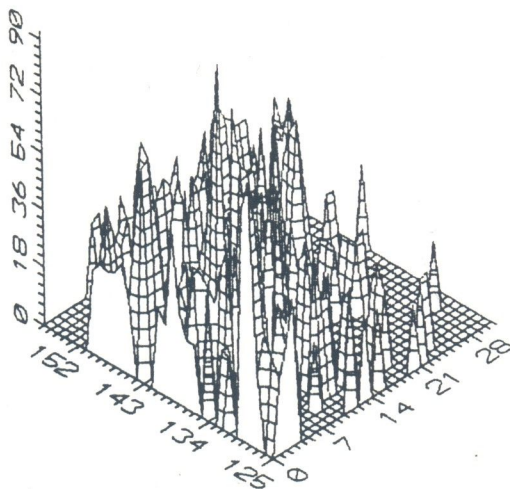


ბ)

რის.3.4.7 Разностные изображения при ВК с отдельными кодовыми книгами а) ортогональной и б) шахматной структуры дискретизации



а)



б)

Рис.3.4.8 Гистограммы ВК с отдельными кодовыми книгами а) ортогональной и б) шахматной структуры дискретизации

ортогональная структура дискретизации, а на рис.3.4.7б и рис. 3.4.8б - шахматная.

И, наконец, была исследована модификация предложенного метода векторного квантования ТВ изображений, в которой при формировании кодовой книги учитывается анизотропия частотно-пространственного спектра реальных ТВ изображений и пространственно-частотных характеристик зрительной системы. Как уже отмечалось в разделе 3.2 последнее может быть учтено путем соответствующего выбора формы блоков, на которые подразделяются исходные ТВ изображения. В разделе 3.2 было указано, что форма блоков в этом случае должна быть ромбовидной. С учетом вышеизложенного, исходное тестовое ТВ изображение было подразделено на блоки ромбовидной формы с числом элементов равным 13 как в центральной, так и в периферийной области. Блоки центральной области были использованы для формирования кодовой книги с числом кодовых векторов равным 128. Эта кодовая книга была использована и для ВК периферийной области ТВ изображения. Результаты моделирования предложенной модификации ВК на тестовом изображении представлены на рис.3.4.9 и рис.3.4.10. При этом ортогональной структуре расположения элементов в кадре соответствуют данные, приведенные на рис.3.4.9а и рис.3.4.10а, а шахматной структуре - на рис.3.4.9б и рис.3.4.10б.

Точностные показатели, рассчитанные по выражениям (3.2.1)... (3.2.4), для всех рассмотренных выше модификаций ВК с переменной точностью квантования, сведены в таблицу 3.4.1. При этом, указанный в таблице вариант (1) соответствует модификации векторного квантования ТВ изображений, при которой для центральной и периферийной областей, при формировании кодовой книги, используются блоки различных размеров и, кроме того, кодовые книги содержат различное число кодовых векторов. Вариант(2) соответствует модифика-

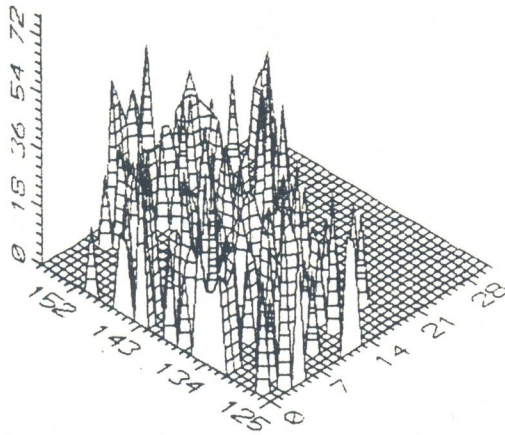


ა)

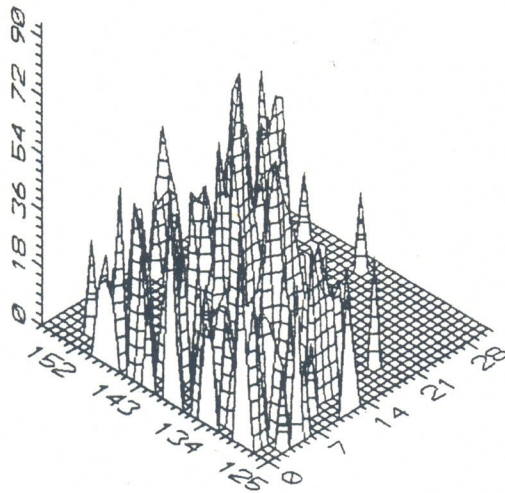


ბ)

Рис.3.4.9 Разностные изображения при ВК ромбовидных блоков, погрешности кодовой книги равной 0,01% в центральной области при а) ортогональной и б) шахматной структурах дискретизации



а)



б)

3.4.10 Гистограммы ошибок ВК при ромбовидных блоках, погрешности кодовой книги равной 0,01% в центральной области при а) ортогональной и б) шахматной структурах дискретизации

или, при которой сформированная с высокой точностью по элементам

Таблица 3.4.1

Варианты ВК с переменной точностью	Структура дискрети- зации	Число дв.ед./эл.	Точностные показатели			
			σ_{Π} (%)	σ_{Π} (%)	γ_2 , дБ	γ_1 , дБ
1	ортогон.	0,44	0,37	1,91	24,32	17,19
	шахматн.	0,22	0,49	2,50	23,14	16,02
2	ортогон.	0,44	0,22	1,13	26,61	19,48
	шахматн.	0,22	0,33	1,70	24,82	17,69
3	ортогон.	0,44	0,26	1,36	25,81	18,68
	шахматн.	0,22	0,38	1,95	24,24	17,11
4	ортогон.	0,58	0,21	1,06	26,86	19,73
	шахматн.	0,29	0,33	1,69	24,86	17,73

только центральной области изображения кодовая книга используется для ВК как центральной, так и периферийной областей. Вариант(3) - это ВК, при котором для центральной и периферийной областей ТВ изображений используются отдельные кодовые книги, размеры которых равны 96 и 32 для центральной и периферийной областей ТВ изображения, соответственно. Но блоки, на которые подразделяются эти области, содержат одинаковое число элементов. Вариант (4) соответствует векторному квантованию (см.вариант (1)) ТВ изображений, базирующемуся на одновременном учете анизотропии энергетического спектра ТВ изображений и пространственно-частотных характеристик зрительного восприятия при создании кодовой книги.

Как следует из данных, представленных в табл.3.4.1 наилучшие результаты, с точки зрения точностных показателей, соответствуют ВК с переменной точностью квантования, базирующемуся на совместном учете характерных особенностей статистических характеристик реальных ТВ изображений и свойств их зрительного восприятия (вариант

(4)). По точностным показателям этот вариант близок к варианту (2), но превосходит по точностным показателям вариант (1) и (3) в среднем на 1,5 дБ. Следует отметить, что точностные показатели варианта (4) практически не отличаются от подобных, приведенных в табл.3.3.2, но при создании кодовой книги по варианту (4) субъективное качество (оцениваемое по видности специфических искажений квантования) восстановленных ТВ изображений на 0,5 балл выше (см. результаты субъективно-статистических экспертиз, приведенные в главе 4). Необходимо также отметить, что как следует из данных табл.3.4.1 независимо от варианта ВК при переходе от ортогональной структуры дискретизации к шахматной точностные показатели процесса ВК снижаются в среднем на 1,5 дБ, но при этом число дв.ед. на элемент ТВ изображения уменьшается вдвое.

3.5. Векторное квантование ТВ изображений на основе контурно-текстурной модели изображений

Как показали экспериментальные исследования ВК ТВ изображений [80,89], наиболее сильные искажения наблюдаются в тех областях изображения, где находятся контуры (перепады). Для оценки искажений контуров введем понятие "целостности контура", которое будет характеризоваться воспроизведением контура по ориентации и местоположению. Для того чтобы сохранить целостность контура, необходимо разделить блоки элементов ТВ изображения (т.е. вектор) в несколько подгрупп в зависимости от наличия или отсутствия контура в блоке. Если блок содержит контур, то его будем классифицировать по ориентации и местоположению контура.

При классифицированном подходе к ВК может быть использована

контурно-текстурная модель изображения [89]. При таком квантовании вектор одного класса должен быть закодирован кодовыми векторами того же класса, а это, в свою очередь, требует, чтобы векторный квантователь содержал классификатор, переключатель и множество векторных квантователей. Такой кодер мы будем называть классифицированным векторным квантователем [80]. На рис.3.5.1 представлена структурная схема КВК.

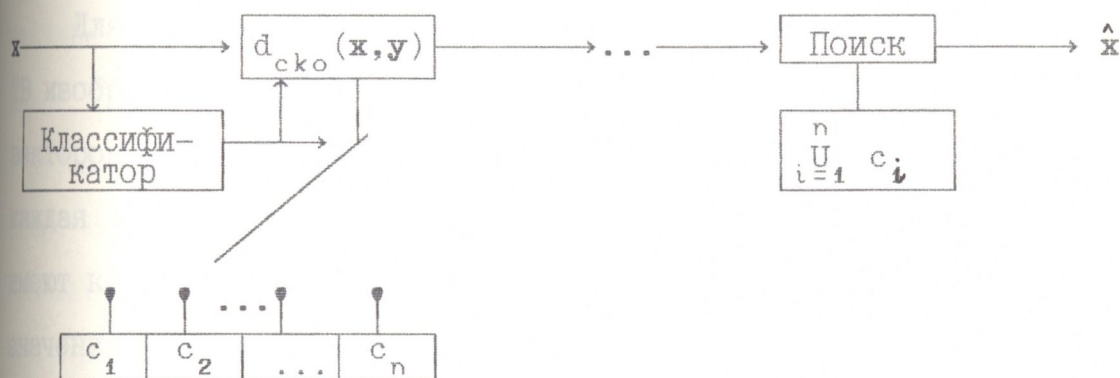


Рис. 3.5.1 Структурная схема КВК

Как уже было отмечено, воспроизведение контуров имеет решающее значение для качества восстановленных ТВ изображений. Контурные после ВК должны быть восстановлены также четко и неразрывно, как они воспроизводятся в исходном изображении. Другими словами, должна сохраниться целостность контура. Известно, что сохранение точного значения градиента около перепада не так важно [80,89]. Что касается угла градиента, он должен быть воспроизведен с большей точностью, чтобы на ТВ изображении не возникала так называемая "лестничная структура" из-за нарушения целостности перепада.

Точные требования к кодированию величины градиента трудно установить, так как возникает сложность учета эффекта маскирования при определении точности квантования градиента. С другой стороны,

При классифицированном подходе к ВК может быть использована контурно-текстурная модель изображения [89]. При таком квантовании вектор одного класса должен быть закодирован кодовыми векторами того же класса, а это, в свою очередь, требует, чтобы векторный квантователь содержал классификатор, переключатель и множество векторных квантователей. Такой кодер мы будем называть классифицированным векторным квантователем [80]. На рис.3.5.1 представлена структурная схема КВК.

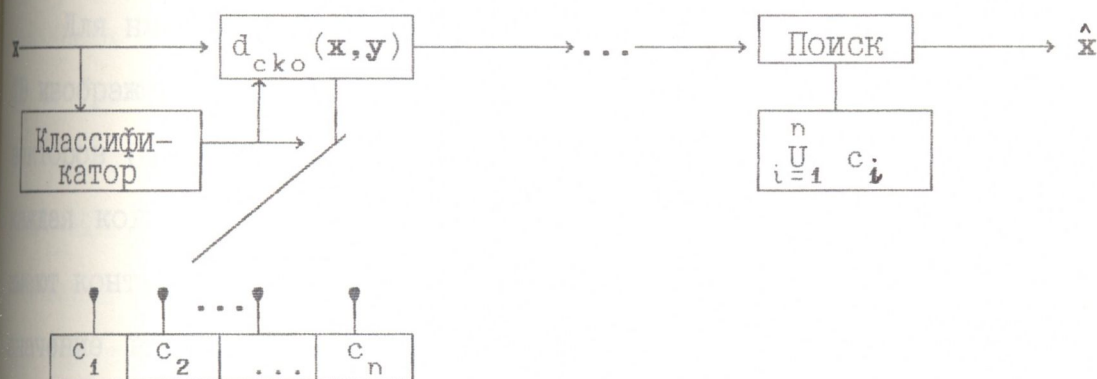


Рис. 3.5.1 Структурная схема КВК

Как уже было отмечено, воспроизведение контуров имеет решающее значение для качества восстановленных ТВ изображений. Контурные после ВК должны быть восстановлены также четко и неразрывно, как они воспроизводятся в исходном изображении. Другими словами, должна сохраниться целостность контура. Известно, что сохранение точного значения градиента около перепада не так важно [80,89]. Что касается угла градиента, он должен быть воспроизведен с большей точностью, чтобы на ТВ изображении не возникала так называемая "лестничная структура" из-за нарушения целостности перепада.

Точные требования к кодированию величины градиента трудно установить, так как возникает сложность учета эффекта маскирования при определении точности квантования градиента. С другой стороны,

при очень грубом квантовании возникает "лестничная структура". Мы можем квантовать величину градиента настолько грубо, насколько это позволяет эффект маскирования при условии, что "лестничная структура" не должна появиться на контурах. Более точное требование к квантованию угла и величин градиента заключается в том, что спектр шума квантования около перепада может иметь значительную энергию только на тех пространственных частотах, на которых сам сигнал имеет высокую энергию. Шум с такими спектральными составами из-за эффекта маскирования наименьше заметен для глаза.

Для наиболее полного учета свойств зрения и источника при ВК ТВ изображений представляется целесообразной классификация входных векторов (блоков) по ориентации и местоположению контура. При этом каждая кодовая книга будет содержать только те векторы, которые имеют контуры заданной ориентации и местоположения, а квантованное значение входного вектора будет выбираться только из той книги, которая принадлежит к тому же классу векторов. При таком подходе, контуры будут воспроизводиться с заданной точностью, т.е. по ориентации и местоположению. Восстановление точного значения интенсивности элементов с обеих сторон контура при этом уже не имеет большего значения. Точность квантования при этом определяется числом кодовых векторов в каждом классе. Поскольку практически число классов ограничено, существует возможность того, что в одном классе будут находиться контуры, отличные по ориентации и местоположению. Шум за счет появления "лестничной структуры" при этом также будет определяться числом кодовых векторов в каждом классе. Чем больше векторов будет в контурном классе, тем меньше будет остаточный шум "лестничной структуры".

Для визуально хорошего воспроизведения целостности контуров выгодно перед квантованием осуществить классификацию контуров. Ес-

ли блок классифицирован как контурный он будет сравниваться только с теми векторами, которые имеют похожие контуры. Классификатор показан на рис.3.5.2. Алгоритм определения точного градиента приводится в Приложении 2. Входной блок изображения, в независимости от размера, классифицируется следующим образом: Текстурный – блок не содержит значительный градиент внутри себя. В отличие от раннего определения текстуры, в данном случае эти участки изображения содержат незначительный градиент;

- среднеградиентный – блок содержит элементы с незначительным значением градиента, но не содержит контур. В этом классе находятся блоки, которые не относятся ни к одному из других классов;

- контурный (перепад) – блок содержит отчетливый контур внутри себя. Контурные блоки разделяются на классы по ориентации и местоположению контура. Для блока малого размера (4x4) удовлетворительным описанием можно считать его аппроксимацию с помощью прямых линий, при заданном угле и местоположения. Перепады одинаковой ориентации и местоположения делятся на две группы, в зависимости от того, каков переход, от черного к белому или наоборот;

- смешанный – блок содержит элементы со значительной величиной градиента, но не содержит четкого контура. Число кодовых векторов такого класса зависит от определения четкого контура и от сложности алгоритма классификации.

Различие между текстурой и среднеградиентным классом основывается на существовании т.н. порога Вебера-Фехнера, что позволяет уменьшить сложность кодирования. Разделение перепадов на два класса мотивируется не свойством зрительного восприятия, а сложностью кодирования т.к. в этом случае увеличивается число классов.

Классификация по ориентации контуров базируется на психофизиологическом свойстве зрения. В работе [152] установлено наличие

корковых клеток зрительной системы, которые реагируют на различную ориентацию контура. Эти клетки делятся на группы, каждая из которых чувствительна только к тем контурам, ориентация которых находится в определенном диапазоне угла наклона. Каждый класс имеет ширину, равную 10-20 градусам. В каждой группе находятся дополнительные пары клеток, для контуров положительной и отрицательной полярности. Это явление обосновывает деление каждого класса контура на два дополнительных класса. Наличие специальных клеток в зрительной системе, детектирующих контуры и их ориентацию подтверждает важность контуров для восприятия изображений. Это подтверждает и правильность классификации блоков перед их векторным квантованием.

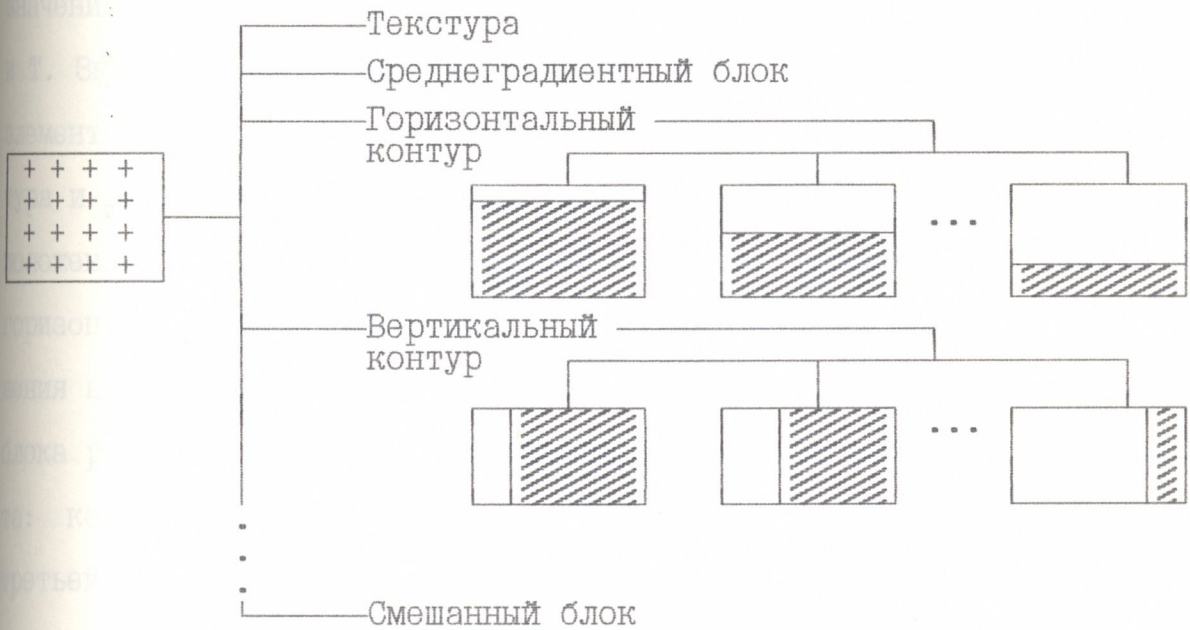


Рис. 3.5.2. Схема процесса классификации

В данной диссертационной работе принято, что контуры являются одномерными. Такие алгоритмы классифицируют контуры более точно [80] и позволяют разделить блоки с контуром и среднего градиента с большей точностью. Алгоритм работы классификатора представлен в приложении 2. Алгоритм предназначен для обработки блоков малого

размера (4x4, 5x5 или 6x6), что позволяет описать контуры с помощью прямых линий с определенным углом наклона и местоположением.

Работа классификатора базируется на нелинейной операции выделения контура с последующим определением его угла и местоположения. Для каждого блока создаются две таблицы градиентов G_r и G_v , для горизонтального и вертикального соответственно. Если блок X имеет размер $p \times r$, то G_r содержит p -строк и $(r - 1)$ -столбцов, а G_v - содержит r -столбцов и $(p - 1)$ -строк. Каждое значение G_r вычисляется в два этапа. Берется разность двух соседних по горизонтали элементов блока и результат делится на их среднее значение с учетом того, что чувствительность глаза пропорциональна нормированному градиенту, а не самому градиенту. Затем полученное значение ограничивается до ± 1 или 0 путем сравнения с порогом $-T$ и T . Значение G_v вычисляется аналогично для смежных по вертикали элементов. Полученные таблицы представляют выделенную версию контура и она затем используется для определения ориентации и местоположения контура. Можно выделить четыре направления контуров - горизонтальное, вертикальное и два диагональных. Число местоположения контура для каждой ориентации зависит от размера блока. Для блока размеров 4x4 и горизонтального контура возможны три варианта: контур может быть между первой и второй, второй и третьей или третьей и четвертой строками. Аналогично, три местоположения возможны и для вертикального контура и четыре для каждого диагонального. Для каждого направления и местоположения возможно наличие контура положительной или отрицательной полярности. Каждая тройка (направление (угол), ориентация и полярность) представлена в таблице комбинацией 0,1 или -1. Детектор угла и ориентации описывается в приложении 2. Когда входной блок не соответствует ни одному из комбинации в таблице, то он будет классифицироваться как

смешанный блок.

Экспериментально был установлен порог T равный 0,2. Число неправильно классифицированных блоков увеличивалось быстро, когда в качестве порога выбиралось, значение 0,1. Приемлемым компромиссом оказался выбор значения порога равный 0,2. Когда значение градиента было ниже порога Вебера-Фехнера, то градиент считался незначительным. Блок считается принадлежащим к текстуре, если градиент находится в пределах порога Вебера-Фехнера.

Если градиент блока не имеет простую структуру, т.е. контур не может быть аппроксимирован прямой линией, мы будем считать, что блок не содержит четко выраженного контура. Такие блоки встречаются относительно редко. Квантование этих блоков может быть довольно грубым, т.к. мелкие детали будут маскировать шумы квантования. Такие блоки будут классифицировать, как принадлежащие к смешанному классу. Если блок не принадлежит ни к текстурному, ни к контурному классу, то он будет причисляться к классу среднеградиентному.

Предположение о линейности и одномерности перепадов подтверждается исследованиями о статистике перепадов в ТВ изображениях. Согласно исследованиям [153] в изображениях встречаются перепады любой ориентации в диапазонах от 0° - 180° . Распределение вероятностей появления перепадов имеет пики на 0° , 45° , 90° и 135° . Типичные перепады имеют прямолинейные участки протяженностью в пять элементов ТВ изображения. Это означает, что линейное аппроксимация перепадов возможна только для блоков малого размера. Было также установлено [153], что протяженность перепадов обычно имеет длительность 1-2 элемента ТВ изображений. Это подтверждает наше предположение об одновременности контуров. Для экспериментальной проверки алгоритма КВК были созданы кодовые книги различных размеров

(128, 256, 512, 1024) при классификации на 15 классов. Было проведено исследование 4x4 -мерного КВК для тестового ТВ изображения "ЛЕНА". В табл.3.5.1 показано число кодовых векторов, предназначенных для каждого класса, число дв.ед./элемент, пиковое отношение сигнал/шум γ_1 и нормированное отношение сигнал шум γ_2 . использовалась классификация на следующие классы: 1 - текстура ; 2 - смешанный без определенных единичных контуров, но со значительным значением градиента; 3 - - среднеградиентный с умеренным значением градиента, но без контуров; 4, 5, 6 - класс горизонтальных контуров с бело-черным перепадом яркости сверху вниз; 7, 8, 9 - класс горизонтальных контуров с черно-белым перепадом яркости; 10, 11, 12 - класс вертикальных контуров с бело-черным перепадом яркости слева на право; 13, 14, 15 - класс вертикальных контуров с черно-белым перепадом яркости.

Алгоритм КВК заключается в следующем. Допустим, C - представляет общую кодовую книгу, а C_i - кодовую книгу каждого класса a_i . Если количество классов равно n , то общая кодовая книга будет представлять объединение кодовых книг каждого класса C_i .

$$C = \bigcup_{i=1}^n C_i . \quad (3.5.1)$$

Примем, что мерой искажений является классифицированная СКО (КСКО)

$$d_{\text{кско}} = \begin{cases} d_{\text{ско}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), & \text{если } \mathbf{x} \in C_i \text{ и } \mathbf{y} \in C_i \\ \infty, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где \mathbf{x} - входной вектор, а \mathbf{y} - кодовый вектор.

На рис.3.5.3 представлены результаты моделирования КВК для тестового ТВ изображения при кодовой книге размером $L=1024$ ($R=0,62$ дв.ед./эл., $\gamma_1 = 29,28$ дБ, а $\gamma_2 = 22,15$ дБ).

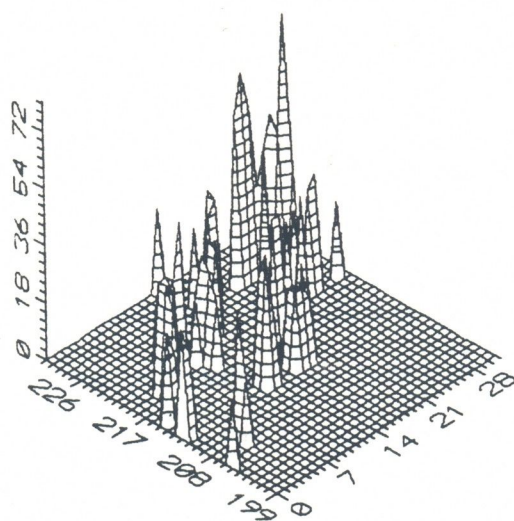
При создании кодовых книг для КВК было обнаружено, что обычный итерационно-кластерный алгоритм, в некоторых случаях, не позволяет создать оптимальную кодовую книгу. Это связано с тем, что алгоритм при нахождении кодового вектора использует процедуру векторного усреднения, которое может вызвать изменение как местоположения контура, так и его ориентации, или вообще потерю контура. Это возможно из-за того, что фактически не существует идеального классификатора, который может точно определить границу между контурным и среднеградиентным классом. Для уменьшения данного нежелательного явления можно предложить следующий модифицированный алгоритм КВК. Перед совмещением каждого вектора в кодовой книге центроидом, полученным в результате векторного усреднения всех обучающих векторов, попавших в данный кластер, происходит проверка принадлежности данного центроида к соответствующему классу. Если за счет усреднения происходит переход из данного класса в другой, то в качестве "нового" кодового вектора для следующей итерации будет выбран "старый" вектор. Было проведено моделирование предложенного метода КВК. На рис.3.5.4 представлены гистограммы ошибок для контурной части тестового ТВ изображения. На рис.3.5.4а представлена гистограмма ошибок для обычного алгоритма КВК, а на рис.3.5.4б для модифицированного, при числе дв.ед. на элемент равном 0,62. Анализ гистограмм показывает, что для модифицированного алгоритма КВК средняя мощность ошибок квантования уменьшилась на 20,4% по сравнению с обычным КВК. А по сравнению с обычным ВК, при том же числе дв.ед на элемент, средняя мощность ошибок квантования уменьшилась на 31,1% .

Таблица 3.5.1

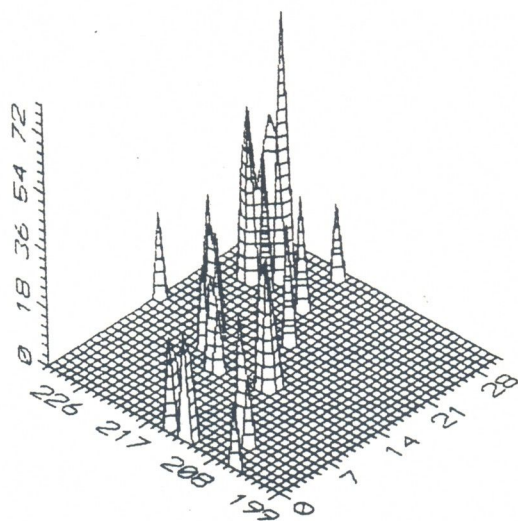
Номер класса	Количество кодовых векторов в классе			
	L = 128	L = 256	L = 512	L = 1024
1	8	16	32	64
2	48	96	192	384
3	32	64	128	256
4	3	6	13	26
5	3	6	13	26
6	4	8	14	28
7	3	6	13	26
8	3	6	13	26
9	4	8	14	28
10	3	6	13	26
11	3	6	13	26
12	4	8	14	28
13	3	6	13	26
14	3	6	13	26
R(დვ.ედ./эл.)	0,43	0,50	0,56	0,62
γ_1 (დბ)	23,46	25,30	27,04	29,28
γ_2 (დბ)	16,33	18,17	19,91	22,15



Рис. 3.5.3 КВК с 15-ю кодовыми книгами при $k=4 \times 4$
 $L = 1024$



а)



б)

рис.3.5.4. Гистограммы ошибок для а)обычного и б)модифицированного алгоритма КВК при $k=4 \times 4$, $L=1024$

3.6. Векторное квантование последовательности

ТВ изображений посредством трехмерных блоков

Как было уже отмечено, процесс ВК сопровождается возникновением специфических искажений. Вопросы уменьшения некоторых специфических искажений были рассмотрены в настоящей главе и было показано, что при правильном выборе формы блоков можно значительно повысить качество восстановленных ТВ изображений.

Процесс ВК может быть разделен на следующие этапы: (1) формирование векторов (блоков), (2) построение кодовой книги и (3) кодирование. Предыдущие главы были посвящены "двухмерному" ВК (ДВК) для кодирования отдельных кадров ТВ изображений, которое использует только внутрикадровую корреляцию. Однако, при кодировании на основе ДВК последовательности ТВ изображений, наблюдаются сильные искажения типа "муар" на фоновых участках движущихся ТВ изображений. Одним из путей устранения искажений такого рода является построение "трехмерного" ВК (ТВК), при котором каждый блок будет формироваться на основе нескольких кадров последовательности ТВ изображений (рис.3.6.1). Таким образом ТВК будет использовать как внутрикадровую, так и межкадровую корреляции [83].

Целью данного параграфа является исследование эффективности перехода от ДВК к ТВК и влияния процесса формирования начальной кодовой книги на интенсивность специфических искажений, сопутствующих процессу ВК.

При исследованиях, путем моделирования на ЭВМ, использовались первые 6 кадров из последовательности ТВ изображений "Разговор по телефону", состоящей из 32 кадров размером 256x256 элементов, представляемых с точностью 8 бит/эл. Эти кадры содержат движения с

умеренной скоростью. На рис. 3.6.2а и рис.3.6.2б показаны 3-ий и 20-ый кадры из этой последовательности.

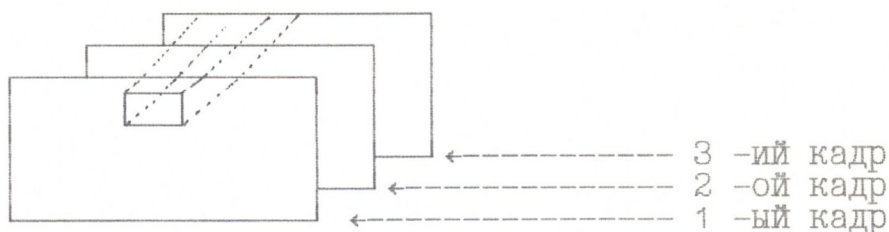


Рис.3.6.1 Структура трехмерного блока

Как показали результаты моделирования, при ТВК неподвижные участки движущихся ТВ изображений восстанавливаются без заметных для зрительного восприятия искажений типа "муар", что типично при ДВК, даже при значительно низком числе дв.ед. ($R=0,07$ дв.ед./эл., $L=128$; $k=4 \times 4 \times 6$, где первая цифра обозначает количество элементов в вертикальном направлении, вторая в горизонтальном, а третья - число кадров). Однако, на движущихся участках ТВ изображений появляются специфические искажения типа "размывания" контуров и "ложные контуры", сильнее выраженные, чем при ДВК с таким же объемом кодовой книги, но при большем числе дв.ед. на элемент ($k=4 \times 4$, $L=128$, $R=0,44$ бит/эл.). Следует отметить, что уменьшение интенсивности искажений типа нарушения целостности контуров на движущихся участках можно достичь увеличением числа кодовых векторов, соответствующих этим участкам. Одним из подходов к решению этой задачи является надлежащее формирование начальной кодовой книги. Как известно [79,78], при формировании кодовой книги важное значение имеет выбор начальной кодовой книги, кодовые векторы которой обычно выбираются равномерно из последовательности обучающих векторов, без учета статистических особенностей ТВ изображений. При моделировании применялись два способа формирования начальной кодовой книги:

- 1) ТВК(1) - кодовые векторы подбирались, равномерно и последова-



ա)



б)

ис.3.6.2. а)3-й и б)20-й кадр из последовательности ТВ изображений

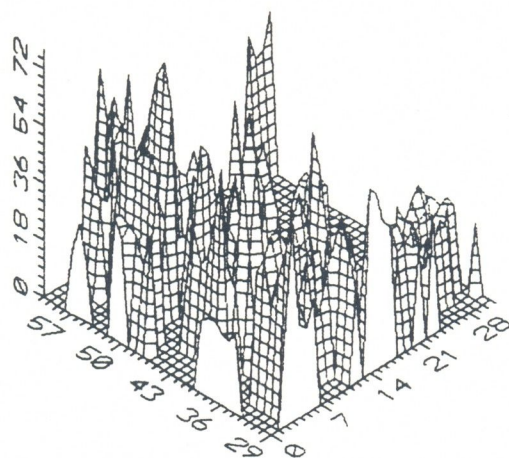
"Разговор по телефону"

только из обучающихся векторов, и 2) ТВК (2) - кодовые векторы выбирались только из движущихся участков ТВ изображений. Как показали исследования, при одинаковой скорости ($R = 0,07$ дв.ед./эл.) ТВК(2) обеспечивает лучшее субъективное качество восстановленных ТВ изображений, несмотря на то, что по точностным показателям эти способы дают практически одинаковые результаты (см.табл.3.6.1). Сравнение субъективного качества восстановленных ТВ изображений, закодированных при одинаковом числе бит ($R = 0,07$ дв.ед./эл.) на основе ТВК и ДВК показывает, что в первом случае общий план ТВ изображений восстанавливается с лучшим качеством, чем при ДВК. На рис.3.6.3а и рис.3.6.3б представлены трехмерные гистограммы ошибок восстановления ТВ изображений при ДВК и ТВК соответственно (при одинаковом числе бит, приходящих на элемент $R = 0,07$ дв.ед./эл.). Субъективная оценка восстановленных ТВ изображений составляет 4 по шкале сравнения МККР. Преимущество имеет восстановленная последовательность ТВ изображений, полученная на основе ТВК.

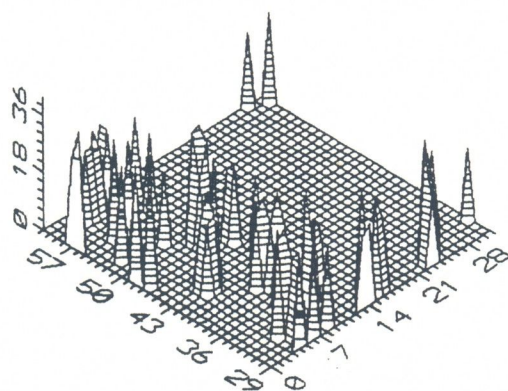
С целью исследования влияния структуры пространственной дискретизации на качество восстановленных ТВ изображений было проведено моделирование ТВК для последовательности ТВ изображений при шахматной структуре дискретизации. Результаты моделирования приведены в табл.3.6.1 (обозначено через $ТВК_{\text{шах}}$). При этом $L=128$, $R=0,035$ дв.ед./эл., т.е. число дв.ед.на эл. снизилось в двое по сравнению с ТВК при ортогональной структуре дискретизации.

Таблица 3.6.1

Номер кадра		1	2	3	4	5	6
γ_1 (дБ)	ТВК(1)	26,24	27,13	27,16	26,46	26,36	25,88
	ТВК(2)	26,18	27,12	27,07	26,64	26,13	25,76
	$ТВК_{\text{шах}}$	25,15	25,88	26,13	26,01	25,72	24,99



а)



б)

Рис.3.6.3. Гистограммы ошибок восстановления при

а)ДВК и б)ТВК ($R=0,07$ дв.ед./эл.)

3.7. Векторное квантование изображений в сочетании с пирамидальным построением

В последние годы большое внимание уделяется обработке сигналов на основе его резделения на частотные подполосы [106,160]. Такой подход обработки сигналов особенно интересен для кодирования сигналов изображений, учитывая, что зрительную систему человека можно смоделировать как состоящую из множества пространственных фильтров. Психофизиологические исследования показали [89,161], что сформированное изображение на сетчатке глаза затем обрабатывается с помощью множества пространственно-ориентированных полосовых частотных фильтров. Было показано, что полоса пропускания этих фильтров находится в пределах одной октавы [161]. Другими словами, изображение разлагается на множество частотных составляющих, ширины полос которых, почти одинакова в логарифмическом масштабе. Было также установлено, что чувствительность глаза зависит также от пространственной ориентации стимула. Установлено, что максимальная чувствительность зрительной системы приходится на контуры с наклоном 0° и 90° . Между горизонтальной и вертикальной ориентацией чувствительность монотонно снижается. С точки зрения учета выше отмеченных свойств зрения, представляет интерес исследование пирамидальных методов кодирования ТВ изображений при их сочетании с векторным квантованием.

Одним из перспективных методов такого построения является представление изображения в виде последовательности изображений, с различным пространственным разрешением. Было установлено [161], что для такого представления удобно ввести пространственно-масштабное преобразование. В этом случае исходное изображение

представляется последовательностью уровней пирамиды с различным пространственным разрешением $(r_j)_{0 \leq j < N}$ ($r_j < r_{j+1}$). Изображения с разрешениями r_j и r_{j+1} , содержат разную избыточность, но более эффективно обрабатывать те дополнительные элементы, которые находятся на уровне с разрешением r_{j+1} . Этот сигнал называется сигналом детальностей на уровне r_{j+1} . Для такого представления было введено новое дискретное представление, названное Вейвлет представлением [161, 163, 164]. Вейвлет представление обеспечивает простую аппроксимацию сигнала, с разрешением r_0 совместно с сигналом детальностей (высокочастотных составляющих), для уровней с разрешением r_j , $1 \leq j \leq N$. Для определения Вейвлет представления вводят масштабное преобразование, которое преобразует разрешение компонентов изображения. Вейвлет представление является особой функцией, которое было исследовано в первые Мейером [162]. Эти функции позволяют строить ортонормированные базисы в пространстве $L^2(R^n)$. Сигнал детальностей, можно получить посредством разложения исходного сигнала, с помощью ортонормированного базиса, и его можно вычислить с помощью пирамидальной архитектуры, с использованием квадратурно-зеркальных фильтров (КЗФ). Вейвлет представление можно интерпретировать, как декомпозицию (разложение) исходного сигнала, на независимые частотные каналы. Для сигналов изображения можно построить сепарабельную декомпозицию, с вертикальной и горизонтальной ориентацией, хотя, математическая модель позволяет построить несепарабельное представление с любым количеством ориентаций.

Рассмотрим некоторые характеристики пирамидального Вейвлет представления. Допустим, T_r является масштабным преобразованием [162], которое характеризует аппроксимацию сигнала с разрешением r . Пространственное разрешение, r , характеризует минимальный

размер деталей, которые можно обнаружить в аппроксимированном изображении. Значение r определяется с учетом единицы расстояния. Как уже отмечалось, сначала осуществляется аппроксимация исходного сигнала, для различного разрешения, а затем определяется т.н. сигнал детальности. Было установлено [161], что для получения последовательностей сигналов детальностей, приблизительно с постоянным количеством информации, в каждом сигнале, разрешения сигналов должно меняться по экспоненциальному закону т.е. $(r^j)_{j \in \mathbb{Z}}$ ($r > 1$). Для упрощения вычислений, на компьютерах, значение r выгодно выбирать равным двум. Математические свойства масштабного преобразования исследованы в работах [162, 163] и показано, что масштабное преобразование с разрешением 2^j , где $j \in \mathbb{Z}$, представляет собой ортонормированную проекцию в пространстве сигналов Y_j . Для определения ортонормированной проекции любого сигнала $f(x)$, следует выбрать ортонормированный базис в пространстве Y_j . Однозначная функция $\Phi(x)$ называется масштабирующей функцией, если для любого $j \in \mathbb{Z}$

$$\Phi^j(x) = \sqrt{2^j} \Phi(2^j x) \quad (3.7.1)$$

и тогда

$$\{\Phi^j(x - 2^{-j} n)\}_{n \in \mathbb{Z}} \quad (3.7.2)$$

является ортонормированным базисом в Y_j , а аппроксимация сигнала $f(x)$, с разрешением 2^j , характеризуется множеством отсчетов:

$$\{(f, \Phi_n^j)\}_{n \in \mathbb{Z}} \quad (3.7.3)$$

здесь (\cdot, \cdot) - обозначает скалярное произведение функций. Дискретную аппроксимацию сигнала $f(x)$ с разрешением 2^j можно определить как множество отсчетов:

$$S_j = \left\{ \sqrt{2^j} (f, \Phi_n^j) \right\}_{n \in \mathbb{Z}} \quad (3.7.4)$$

Последнее выражение можно интерпретировать как низкочастотную фильтрацию сигнала [161,163]. Действительно, после такой аппроксимации из сигнала удаляются все детали, размер которых меньше, чем 2^j .

Практически, при обработке сигналов на компьютерах, дискретная аппроксимация, исходного сигнала определяется интервалом дискретизаций и, разрешение обрабатываемого сигнала, определяется как $1:S_0$. Принцип каузальности позволяет определить все S_j , для $j < 0$, из S_0 . Практически эта процедура осуществляется итеративным алгоритмом, который называется пирамидальным преобразованием и определяется выражением [161].

$$\sqrt{2^j} (f, \Phi_n^j) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sqrt{2^{j+1}} (f, \Phi_k^{j+1}) h(2n - k) \quad (3.7.5)$$

где $h(.)$ - импульсный отклик дискретного фильтра.

Как известно, сигнал изображения содержит большую избыточность на каждом уровне разрешения. Поэтому, эффективнее обрабатывать те детали изображения, которые присутствуют в изображении с разрешением 2^{j+1} и не присутствуют на уровне с разрешением 2^j . Аппроксимация сигнала с разрешением 2^{j+1} и не присутствуют на уровне с разрешением 2^j . Аппроксимация сигнала с разрешениями 2^{j+1} и 2^j осуществляется, соответственно, с помощью ортогональной проекции сигнала на Y_{j+1} и Y_j . Сигнал детальностей для уровня с разрешением 2^{j+1} , определяется ортогональной проекцией исходного сигнала на векторном пространстве O_j [161]. Для определения ортогональной проекции сигнала $f(x)$, следует определить ортонормированный базис в пространстве O_j . Такой базис можно построить путем масштабирования и переноса однозначной функции Вейвлет [161,163].

Если $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ - векторное пространство, $\Phi(x)$ -функция масштабирования и H соответствующий квадратурный фильтр, то если $\phi^j(x) = \sqrt{2^j} \phi(2^j x) : \{\phi(x - 2^{-j}n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ является ортонормированным базисом пространства O_j , тогда $\{\phi^j(x - 2^{-j}n)\}_{(n,j) \in \mathbb{Z}}$ является ортонормированным базисом, в пространстве $L^2(\mathbb{R})$. Функция $\phi(x)$ - называется Вейвлет. Ортонормированный базис в O_j может быть построен путем масштабирования Вейвлет, $\phi(x)$, с коэффициентом 2^j , и его переносом на "сетку" с интервалом пропорциональным 2^{-j} . С увеличением пространственной частоты, Вейвлет спадает асимптотически так же, как и соответствующая функция масштабирования. Разложение сигнала в ортонормированном базисе Вейвлет является как бы промежуточным между Фурье преобразованием и пространственным представлением.

Модель Вейвлет преобразования, может легко распространить на любую размерность n , но нас интересует двухмерный случай, когда сигналом является изображение. В этом случае исходной функцией является $f(x,y) \in L^2(\mathbb{R}^2)$. Как и в одномерном случае, аппроксимация сигнала, $f(x,y)$ с разрешением 2^j , определяется как ортогональная проекция на векторное пространство V_j . В этом случае выгодно определить сигнал высоких пространственных частот (сигнал деталей) для двух приоритетных направлений - в горизонтальном и вертикальном. Функция масштабирования при этом определяется как $\Phi(x, y) = \phi(x) \phi(y)$ (3.7.6) где $\phi(x)$ - одномерная функция масштабирования. Аппроксимацию сигнала $f(x, y)$ - с разрешением 2^j можно охарактеризовать с помощью [164]

$$S_j = \left\{ 2^j (f(x,y), \Phi_n^j(x) \Phi_m^j(y)) \right\}_{(n,m) \in \mathbb{Z}} \quad (3.7.7)$$

Как и в одномерном случае, предположим, что исходный сигнал

представлен с разрешением $1:S_0$. Для любого $J < 0$, дискретное изображение полностью можно охарактеризовать с помощью $-3J+1$ - дискретных изображений [164].

$$\left\{ S_j, (D_j^1)_{J \leq j \leq -1}, (D_j^2)_{J \leq j \leq -1}, (D_j^3)_{J \leq j \leq -1} \right\} \quad (3.7.8)$$

Последнее выражение является двухмерным Вейвлет представлением. S_j - базовое изображение, D_j^k - характеризуют сигналы высших пространственных частот с различной ориентацией и разрешением. Если исходное изображение содержит N^2 элементов, каждое изображение D_{j-1} , D_{j-1}^1 , D_{j-1}^2 , D_{j-1}^3 - содержит $2^j \cdot N^2 (j < 0)$ элементов. Общее число элементов изображения, при таком представлении, равно числу элементов в исходном изображении. Исследования свойств пирамиды Вейвлет показали, что пирамидальные построения ортогонального типа, можно эффективно использовать при векторном квантовании ТВ изображений [34].

В наших исследованиях [34] на каждом уровне пирамиды Вейвлет преобразования образуются четыре изображения (рис.3.7.1): НВ-изображение, несущее информацию о высокочастотном сигнале в горизонтальном направлении и низкочастотном в вертикальном (горизонтальные контуры); ВН-изображение, подчеркивающее наличие вертикальных контуров, что в области пространственных частот соответствует низкочастотной фильтрации по горизонтали и высокочастотной по вертикали, ПН-изображение, содержащее информацию о наличии детальности в изображении в диагональных направлениях. НВ, ВН, ПН изображения создают уровень пирамиды Вейвлет. Что касается изображения ВВ, то оно содержит основную информацию об изображении. Этому изображению в плоскости преобразования Фурье соответствует низкочастотная фильтрация как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Это изображение является базовым для пос-

строения следующего уровня пирамиды или играет роль вершины пирамиды, если построение прекращается. Если L – число уровней пирамиды, то в результате пирамидального построения исходное изображение, содержащее N^2 отсчетов, превращается в набор изображений BH , HB , NN , ($1 \leq j \leq L$) и BV_L . Изображения BH , HB , BV являются носителем информации, которая соответствует "разности" между BV_{j-1} и BV_j изображениями, имеющие место при переходе от $j-1$ к j -тому уровню пирамиды. На рис.3.7.1 приведено условное расположение изображений для 2-х уровней пирамиды Веивлет с вершиной BV_2 . На рис. 3.7.2 представлена схема построения первого уровня пирамиды Веивлет [161]. Здесь G – фильтр высоких частот, H – фильтр низких частот, D – блок децимаций.

Для экспериментального исследования векторного квантования в сочетании с Веивлет преобразованием, были использованы несколько различных вариантов размера и конфигурации блока, а также объема кодовой книги [34,164,184]. Векторному квантованию, вначале, подвергалась только низкочастотная составляющая, вершина пирамиды, соответствующая трехуровневой и двухуровневой пирамиде Веивлет. Использовались фильтры с импульсной характеристикой длиной

BV2	HB2	HB1
BH1	NN2	
BH1		NN1

Рис. 3.7.1 Разделение на области двухуровневые пирамиды с Веивлет

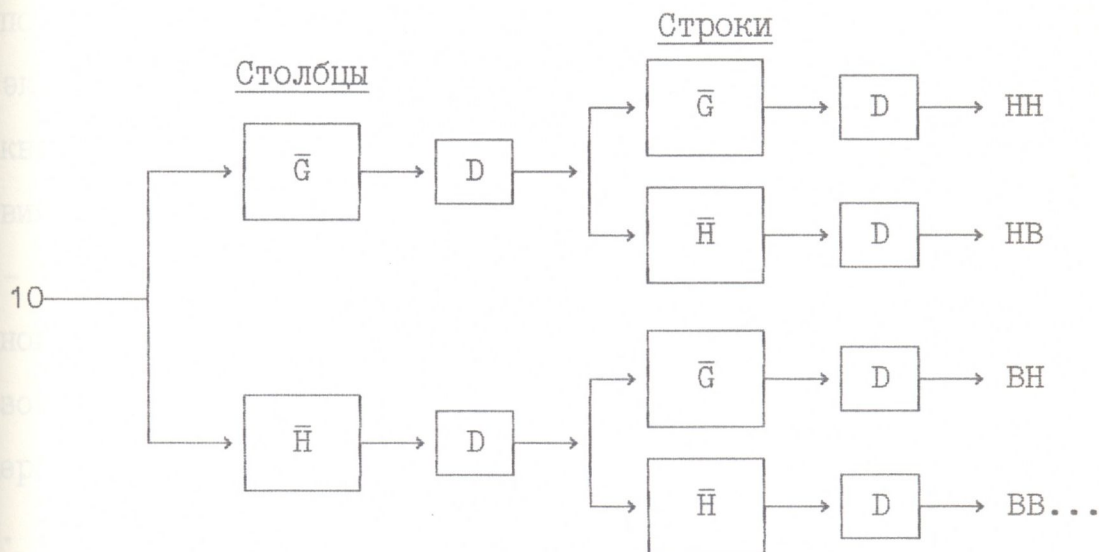


Рис.3.7.2. Двухмерная пирамида с использованием фильтров Вейвлет.

$N = 2$ и $N = 16$. В табл. 3.7.1 представлены результаты эксперимента, в котором векторно квантовалась область ВВЗ при скорости $R = 2,071$ бит/эл.. Там же приведены основные точностные показатели и коэффициенты сжатия (КС). Области второго и первого уровней пирамиды квантовались на 16 и 8 уровней оптимальной неравномерной шкалой. Восстановление исходного ТВ изображения осуществлялось также без области НН1. В табл.3.7.2 приведены результаты исследований ортогонального пирамидального кодирования ТВ изображений в сочетании с шахматной структурой дискретизации и оптимальным неравномерным квантованием первого уровня пирамиды. Анализ результатов таблиц 3.7.1 - 3.7.3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Неучастие в восстановлении ТВ изображения области НН1 позволяет увеличить коэффициент сжатия (от 1,84 до 2.09), тогда как отношение сигнал-шум уменьшается незначительно.

2. Переход от ортогональной структуры дискретизации к шахматной позволяет уменьшить число бит на элемент, ($R = 0,77$). Дальнейшие эксперименты по сочетанию пирамидального построения с векторным квантованием имели ввиду, ВК областей первого уровня пирамиды. Условия кодирования были следующие: составляющие ВВЗ, ВНЗ, НВЗ, ННЗ - передавались полностью; ВН2, НВ2, НН2 - квантовались оптимальной неравномерной шкалой на 16 уровней; ВН1, НВ1, НН1 - использовалось векторное квантование с объемом кодовой книги 128, размером блока 4x4 (при $R \approx 0,44$ бит/эл.). Результаты сведены в табл. 3.7.3. В табл. 3.7.4 приведены результаты, полученные при обычном векторном квантовании тестового ТВ изображения, но без построения пирамиды Веивлет. На рис.3.7.1 а,б,в представлены результаты кодирования тестового изображения, при сочетании векторного квантования по данным табл.3.7.3. Изображение 3.7.1а соответствует скорости $R = 0,9$ бит/эл., 3.7.1б - скорости $R = 0,79$ бит/эл. и 3.7.1в - скорости $R = 0,68$ бит/эл. Анализ результатов, приведенных в табл. 3.7.2 и 3.7.3 показал, что векторное квантование более эффективно, когда оно применяется для квантования первого уровня пирамиды Веивлет при условии, когда третий уровень пирамиды, в том числе "вершина" (низкочастотная область ВВЗ) не подлежит квантованию и коэффициент сжатия составляет $КС = 11,7$, а ПОСШ 29,2 дБ. Эффективность обычного векторного квантования возрастает, когда оно используется в сочетании с пирамидальным построением Веивлет и осуществляется на первом уровне пирамиды.



a)



б)



в)

Рис. 3.7.3 ТВ изображения после ВК с Вейвлет-Пирамидой
при: а) $R = 0,9$ бит/эл.; б) $R = 0,79$ бит/эл.;
в) $R = 0,68$ бит/эл.

Таблица 3.7.1

Дл ВФ N	Способы кодиров. ТВ изображения	Точностные показатели				Эфф.кодиров.	
		СКО	НСКО %	ОСШ дБ	ПОСШ дБ	КС	R _{бит/эл}
16	все составляющ.	9,15	1,13	21,71	28,87	4,78	1,67
	без НН1	9,93	1,22	21	28,16	6,62	1,28

Таблица 3.7.2

Дл ВФ N	Способы кодиров. ТВ изображения	Точностные показатели				Эфф.кодиров.	
		СКО	НСКО %	ОСШ дБ	ПОСШ дБ	КС	R _{бит/эл}
16	все составляющ.	11,55	1,42	19,69	26,85	8,30	0,97
	без НН1	11,71	1,44	19,57	26,73	10,39	0,77

Таблица 3.7.3

Дл ВФ N	Способы кодиров. ТВ изображения	Точностные показатели				Эфф.кодиров.	
		СКО	НСКО %	ОСШ дБ	ПОСШ дБ	КС	R _{бит/эл}
16	все составляющ.	7,73	0,95	23,18	30,34	8,80	0,90
	без НН1	8,26	1,02	22,59	29,75	10,0	0,79
	без НН1, НВ1	8,81	1,08	22,04	29,20	11,70	0,68

Таблица 3.7.4

Векторное квантование исх.ТВ изоб.	Точностные показатели				Эфф.кодиров.	
	СКО	НСКО %	ОСШ дБ	ПОСШ дБ	КС	R _{бит/эл}
1,17 бит/эл.	8,37	1,03	22,49	29,65	6,70	1,17

Выводы к главе 3

Глава 3 содержит результаты исследований влияния сегментаций и пространственной дискретизации на точностные показатели ВК, с учетом характерных особенностей статистических характеристик реальных ТВ изображений и свойств их зрительного восприятия на основе контурно-текстурной модели изображений, а также результаты исследования сочетания ВК с пирамидальным построением.

Оригинальными материалами обладающими авторским приоритетом, в данной главе являются:

1. Исследование влияния на точностные показатели процесса ВК статистических характеристик реальных ТВ изображений, учитывая изменение как формы блоков, на которые подразделяются исходные ТВ изображения, так и структуры пространственной дискретизации, учитывающий анизотропию пространственного спектра ТВ изображений, при различных критериях, используемых для формирования начальной кодовой книги.

2. Разработка и исследование методов уменьшения специфических искажений ВК ТВ изображений путем усиления корреляционных связей на границе соседних блоков (методы "перекрытия блоков") и интерполяционного ВК, базирующегося на исследовании статистических взаимосвязей между элементами смежных блоков ТВ изображений.

3. Разработка и исследование векторного квантования ТВ изображений, с учетом их зрительного восприятия, основанного на переменной точности квантования в пространственной области.

4. Исследование влияния классификации ТВ изображений на контурные и текстурные части с целью построения различных кодовых книг, для этих частей с учетом особенностей зрительного восприятия искажений контуров и их статистических характеристик при различных объемах кодовой книги.



5. Исследование влияния перехода от двумерных блоков к трехмерному при ВК последовательностей ТВ изображений, с целью уменьшения специфических искажений, сопутствующих процессу ВК последовательности ТВ изображений, при малом числе двоичных единиц на элемент изображения.

6. Исследование возможности кодирования ТВ изображений на основе сочетания пирамидального построения Веивлет с векторным квантованием.

Результаты исследований изложенные в данной главе, дали возможность:

1. Установить, что переход, при ВК ТВ изображений, от ортогональной структуры дискретизации к шахматной, приводит к снижению точностных показателей процесса ВК в среднем на 2 дБ, в то же время число бит/эл. при переходе к шахматной структуре уменьшается в двое. Кроме того, точностные показатели ВК, при формировании кодовой книги на основе критерия минимума среднеквадратической ошибки выше, чем при использовании критерия минимакса.

Показать, что переход при формировании начальной кодовой книги, от блоков квадратной формы к прямоугольной для некоторых ТВ изображений, в том числе и "ЛЕНА", с большим вертикальным размером, а для других ТВ изображений, в том числе и "ШКОЛА", с большим горизонтальным размером, практически не изменяет точностных показателей процесса ВК, в то время, как в общем случае переход блокам прямоугольной формы с большим горизонтальным или вертикальным размером приводит к уменьшению точностных показателей в среднем на 1 дБ, а при использовании блоков, имеющих форму параллелограмма точностные показатели ухудшаются в среднем на 2 дБ.

Показать, что переход к блокам ромбовидной формы при формировании начальной кодовой книги обеспечивает улучшение

точностных показателей ВК по сравнению со всеми другими формами блоков. Так, например, по сравнению с прямоугольной формой блоков выигрыш в отношении сигнал-шум квантования составляет в среднем 0,45 дБ, а по сравнению с блоками, имеющими форму параллелограмма - 1,5 дБ.

2. Показать, что восстановление ТВ изображений подвергнутых ВК, применением блоков перекрывающих столбцы и строки, сформированные путем интерполяции на основе элементов принадлежащих соседним блокам, позволяет увеличить, например, пиковое отношение сигнал-шум в среднем на 1,5 дБ.

Установить, что интерполяционное ВК дает возможность существенного уменьшения специфических искажений ВК ТВ изображений. Так, например, пиковое отношение сигнал-шум увеличивается в среднем на 1,2 дБ, по сравнению методами "перекрытия блоков".

3. Установить, что векторное квантование ТВ изображений с переменной точностью квантования, при котором учитывается как зависимость остроты зрения от угла периферийности, так и анизотропия пространственного спектра реальных ТВ изображений и свойство их зрительного восприятия, позволяет улучшить субъективное качество восстановленных ТВ изображений, на 0,5 балла шкалы сравнения.

4. Установить, что переход от обычного ВК к классифицированному ВК, на основе контуро-текстурной модели ТВ изображений, позволяет повысить качество восстановленных контуров ТВ изображения. Предложенная методика модифицированного КВК позволяет уменьшить среднюю мощность ошибок в контурной части изображения на 20,4% по сравнению с обычным КВК, и на 31,1% по сравнению с обычным алгоритмом ВК.

5. Показать, что переход от двумерного блока к трехмерному дает возможность значительно уменьшить специфические искажения ти-

па "муар", что типично для ВК последовательности ТВ изображений на основе двумерного ВК. Кроме того, трехмерное ВК позволяет значительно снизить число дв.ед. на элемент изображения, сохраняя приемлемое качество восстановленной последовательности ТВ изображений при $R = 0,07$ бит/эл. и пиковом отношении сигнал-шум в среднем 27 дБ.

6. Повысить эффективность кодирования ТВ изображений на основе сочетания пирамидального построения Веивлет с векторным квантованием областей пирамиды, содержащих высокочастотные составляющие сигнала. При этом коэффициент сжатия $КС = 10$, а ПОСШ = 29,75 дБ. Показать, что если из процесса восстановления исключить область первого уровня пирамиды, с высокочастотными составляющими сигнала в обоих направлениях, то коэффициент сжатия может быть увеличен на 1,7 при снижении ПОСШ на 0,5 дБ.

Г Л А В А 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ В СОЧЕТАНИИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ И РЕШЕТЧАТЫМ КВАНТОВАНИЕМ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

4.1. Задача исследования

В данной главе диссертационной работы ставится задача теоретического и экспериментального исследования векторного квантования в сочетании с дискретным косинус-преобразованием и решетчатым квантованием. Хотя кодирование с преобразованием используется на протяжении долгого времени для кодирования ТВ сигналов, но при таком кодировании, в основном использовались различные алгоритмы скалярного квантования [53,165,166]. Однако, следует отметить, что скалярное квантование не позволяет учитывать статистические связи между коэффициентами преобразования. С этой точки зрения целесообразно исследовать векторное квантование в сочетании с ортогональным преобразованием. Выбор вида ортогонального преобразования во многом определяется существованием быстрых алгоритмов вычислений коэффициентов преобразования. С точки зрения концентрации энергии коэффициентов преобразования, в низкочастотной области спектра сигналов изображения и наличия быстрого алгоритма вычислений преобразования, следует отметить дискретное косинус преобразование (ДКП). Несмотря на то, что векторное квантование в сочетании с ДКП исследованы в работах [81,167], некоторые вопросы, касающиеся адаптивных алгоритмов классификации и сочетания ДКП с решетчатым векторным квантованием, требуют дальнейших исследований.

Как отмечалось в предыдущих главах настоящей диссертационной

работы, одним из важных вопросов, при ВК ТВ изображений, является уменьшение объема вычислений связанных как с созданием кодовой книги, так и с кодированием ТВ изображений. С этой точки зрения следует отметить кодирование на основе каскадного векторного квантования ТВ изображений [82,88]. Однако, рабочие характеристики каскадного ВК хорошо исследованы для кодирования речевых сигналов [82,88]. При кодировании ТВ сигналов на основе каскадного ВК появляются возможности как сокращения объема необходимой памяти и вычислительных затрат, так и использования эффекта рандомизации процесса квантования при надлежащем выборе параметров каскадного ВК [35].

Для оценки качества квантованных ТВ изображений большое значение имеет выбор подходящего критерия "близости" между исходным и квантованным изображениями. Наиболее часто, для этой цели используются отношение сигнал-шум и среднеквадратическая ошибка. Однако, следует отметить, что при векторном квантовании ТВ сигналов, характер искажений изображения отличается от искажения при скалярном квантовании. Если изображение, квантованное скалярным квантователем, сравнить с изображением квантованым векторным квантователем на основе ОСШ и СКО, то установление степени "близости" квантованных и исходных изображений крайне затрудняется. Поэтому, с целью более достоверной оценки "близости" квантованных и исходных изображений, следует ввести и другие качественные и информационные характеристики ТВ изображений, позволяющие более точно оценить качество различных алгоритмов квантования [32]. Для окончательной оценки качества квантованных ТВ изображений, и оценки достоверности качественных показателей, следует также осуществить субъективно-статистическую экспертизу векторного квантования ТВ изображений.

В данной главе представлены результаты экспериментальных ис-

следований скалярного квантования для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи со скоростью 24 Мбит/с и описана работа устройства обнаружения локализации и коррекций ошибок декодирования изображений. Представлено так же описание кодека ТВ сигналов для систем видеоконференцсвязи со скоростью 256 кбит/с, в котором использован векторный квантователь, разработанный на основе результатов, полученных в данной диссертационной работе.

Изложению выше перечисленных вопросов посвящена данная глава диссертационной работы.

4.2. Векторное квантование ТВ изображений в сочетании с дискретным косинус-преобразованием

Кодирование с преобразованием долгое время используется как эффективный метод кодирования ТВ изображений [165-167]. Традиционно, такое кодирование использовалось в сочетании со скалярным квантованием коэффициентов трансформант, с учетом статистики их дисперсий, однако, в этом случае не удается учитывать, связь между коэффициентами. Преимущество векторного квантования по отношению со скалярным, можно использовать и при кодировании с преобразованием. Как известно [46,166] наилучшее, в смысле среднеквадратической ошибки, ортогональное преобразование определяется его способностью к концентрации энергии спектра в возможно более узких границах. С учетом этого, было показано, что преобразование Карунена-Лоэва характеризуется наименьшей среднеквадратической ошибкой по сравнению со всеми другими ортогональными преобразованиями [46, 165]. Однако, следует отметить, что из-за вычислительных трудностей, связанных вычислениями коэффициентов преобразования Карунена-Лоэва, его практическое использование значительно затрудняется. Наиболее близкие к преобразованию Карунена-Лоэва результаты можно получить на основе дискретного косинуса преобразования (ДКП). Следует также отметить, что для ДКП существуют быстрые алгоритмы вычислений [166,169], что является немаловажным фактором при практической реализации ДКП. Для быстрого алгоритма ДКП [169], следует произвести $(3N/2)(\lg_2 N - 1) + 2$ сложений реальных чисел, и $N \lg_2 N - 3N/2 + 4$ умножений. Так, для блока с размерностью 16×16 , полная операция кодирования и декодирования требует в среднем 9,25 умножений и 5,50 сложений для каждого элемента изображения.

Векторное квантование в преобразованной области имеет ряд

преимуществ по сравнению с ВК в пространственной области. В частности, основная энергия коэффициентов преобразования сосредоточена в низкочастотных коэффициентах. Исходя из этого кодовая книга ВК может быть оптимизирована только для низкочастотных коэффициентов и некоторая часть высокочастотных коэффициентов может быть отброшена. Известно так же, что распределение вероятностей коэффициентов преобразования хорошо описывается распределением Лапласа, а это дает возможность построить универсальную кодовую книгу для различных изображений. Методы ВК в преобразованной области исследовались в различных работах [167,168], однако, в этих работах не достаточно полно были выявлены преимущества ВК, в сочетании с ДКП и, вопросы адаптивного классифицированного ВК в сочетании с ДКП. Недостаточно исследованы также вопросы использования решетчатого квантования коэффициентов ДКП. В настоящем разделе приводятся результаты экспериментального исследования ДКП ТВ изображений в сочетании с адаптивным классифицированным ВК, в следующем разделе рассмотрены вопросы решетчатого квантования.

Структурная схема ВК в сочетании с ДКП ТВ изображений представлена на рис.4.2.1. Исходное изображение, сначала делится на блоки размером 8x8 (исследовались также блоки 4x4)). Затем для этих блоков использовались двухмерное косинус преобразование, на основе выражения [169]

$$X(u,v) = \frac{2C(u) C(v)}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} X(i,j) \cos \frac{(2i+1) u\pi}{2N} \cdot \cos \frac{(2j+1) v\pi}{2N},$$

(4.2.1)

$u, v = 0, 1 \dots N - 1.$

где

$$C(l) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & \text{для } l = 0 \\ 1 & \text{для } l = 1, 2 \dots N-1 \end{cases}$$

Классификация энергии высокочастотных коэффициентов осуществляется на основе выражения

$$E_{m,t} = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} [F_{m,e}(u,v)]^2 - [F_{v,e}(0,0)]^2 \quad (4.2.2)$$

Высокочастотные коэффициенты классифицировались на четыре класса по их энергии. Адаптация заключается в том, что для тех блоков, энергия коэффициентов которых выше, выделяется большее число бит, чем для блоков, с малой энергией. Эта процедура осуществляется методом зонального отбора [46,53]. После этого отобранные блоки подвергаются векторному квантованию с помощью различных кодовых книг. Общая кодовая книга состоит из четырех различных кодовых книг, соответствующих различному классу блоков. Кодер осуществляет скалярное квантование первого коэффициента преобразования. В кодер поступает также индекс классификатора и после энтропийного кодирования вся информация передается в канал.

Как показали экспериментальные исследования [32,81] кодирование ТВ изображений в преобразованной области в сочетании с ВК, дает лучшее качество восстановленного изображения. Особенно в областях с плавными изменениями яркости изображения.

В наших экспериментах преобразованное изображение было классифицировано на четыре класса так называемой активности, которая определяется на основе выражения (4.2.2). Классификация осуществлялась на блоках низкой и высокой активности. В каждом классе использовались кодовые векторы с размерностью 64, 64, 128, 128, соответственно. В этом случае пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ) составило 29,7 дБ, при $R = 0,25$ бит/эл. Для сравнения обычное ВК с размером блока 8×8 и кодовой книги размером 384 дает $ПОСШ = 24,4$ дБ. Субъективное качество восстановленных изображений также улучшилось по сравнению с ВК в пространственной области. На рис.4.2.2 представлено восстановленное ТВ изображение на основе сочетания ДКП с векторным квантованием.

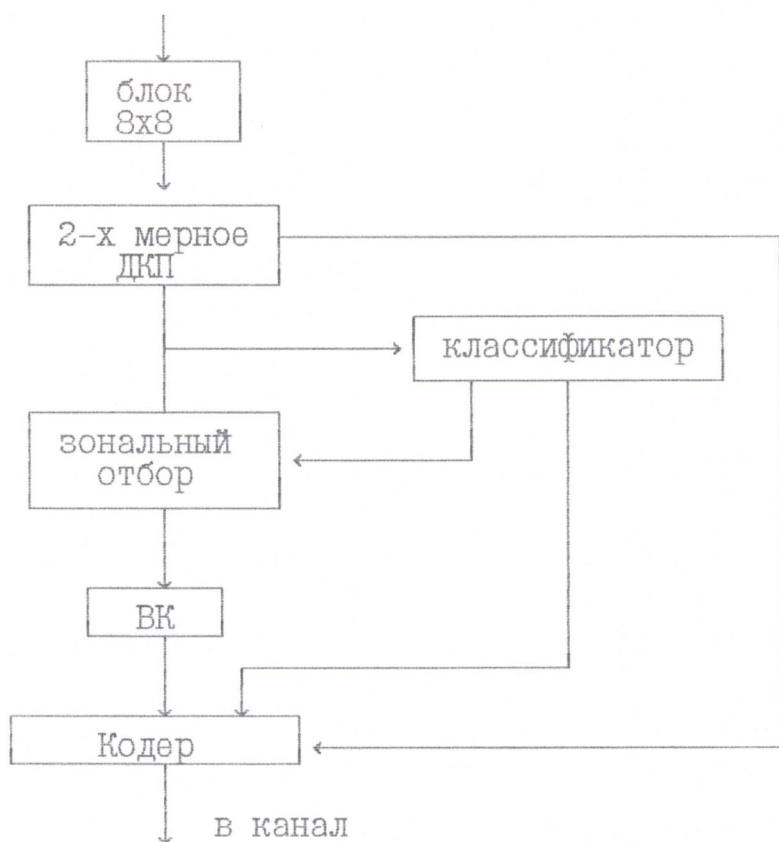


Рис. 4.2.1 Структурная схема ВК с ДКП



Рис. 4.2.2 Восстановленное ТВ изображение при
сочетании ДКП с ВК

4.3. Решетчатое векторное квантование ТВ изображений

Векторное квантование на основе алгоритма ЛБГ, хотя и дает хорошие результаты кодирования, но при его реализации возникают сложности, связанные с экспоненциальным ростом необходимых вычислений (см. главу 1). Этот алгоритм используется как при кодировании в пространственной области, так и при кодировании коэффициентов трансформант. В главе 1 были рассмотрены методы снижения сложности векторного квантования, связанные с выбором начальной кодовой книги и различными способами ускорения процесса ВК ТВ изображений. В настоящем разделе приводятся результаты исследования связанные с ускорением нахождения кодовой книги на основе решетчатого ВК [32,110].

В отличие от ЛБГ алгоритма, решетчатые векторные квантователи имеют регулярную структуру, что позволяет снизить сложности, связанные с построением векторных квантователей. Однако, следует отметить, что решетчатые квантователи наиболее оптимальны для источников с равномерным распределением при среднеквадратической мере искажений и бесконечных решеток. Решетку будем определять как множество векторов.

$$\Lambda = \{ \mathbf{X} : \mathbf{X} = u_1 \mathbf{a}_1 + u_2 \mathbf{a}_2 + \dots u_N \mathbf{a}_N \} \quad , \quad (4.3.1.)$$

где \mathbf{a}_i , $i = 1, 2 \dots N$, базисные векторы решетки, u_i - целые числа. Для векторного квантования, путем решетки, следует выбрать L - выходных точек решетки, которые находятся отображением источника \mathbf{X} на решетку. После отображения находятся выходные точки $\mathbf{Y}_i = Q(\mathbf{X})$ и затем вокруг выходных точек формируются ячейки Вороного S_i , так, что $\mathbf{Y}_i \in \Lambda$ если $\mathbf{X} \in S_i$. Можно построить различные решетки для кван-

товании ТВ изображений, однако построение оптимальных решеток в многомерном пространстве является самостоятельной пока нерешенной математической проблемой и исследуется в специальных изданиях [110.132]. С точки зрения создания быстрого алгоритма ВК ТВ изображений нами были исследованы некоторые из известных решеток, для которых существуют быстрые алгоритмы. Эти решетки известны под названием решеток корней. Алгоритмы построения этих решеток основаны на специфических свойствах решеток корней [110]. Например, если наложить решетку D_N на прямоугольную решетку Z^N , можно заметить, что D_N - решетка состоит из тех точек прямоугольной решетки, сумма координат которых четное число. Таким образом, для нахождения ближайшей к входному вектору, точки решетки D_N , мы можем найти ближайшую точку решетки Z^N сумма координат которой четное число.

Алгоритм поиска ближайшей к входной точке, $x \in R^N$, точки Z^N , состоит в следующем [110]. Для вещественного числа x , определяется функция $f(x)$, которая равняется ближайшему к x целому числу. В случае полуцелого x , выбираем число с наименьшей абсолютной величиной. Разность между x и $f(x)$ обозначается как

$$\sigma(x) = x - f(x) \quad (4.3.2)$$

Вводится также функция $W(x)$, которая является "следующим", после $f(x)$, ближайшим целым числом к x . В случае полуцелого x , выбирается число с наибольшей абсолютной величиной. Для вектора $x \in R^N$, определяем векторную функцию $f(X) = (f(X_1), f(X_2) \dots f(X_N))$. Для заданной точки $X = (X_1, X_2 \dots X_N)$ допустим, что k -целое число и

$$|\sigma(x_k)| \geq |\sigma(x_i)|, \quad 1 \leq i \leq N \quad (4.3.3)$$

тогда выполнение равенства

$$|\sigma(x_k)| = |\sigma(x_i)| \quad (4.3.4)$$

влечет за собой, $k \leq i$ и определяем

$$g(x) = ((f(x_1), f(x_2), W(x_k), \dots, f(x_N)) . \quad (4.3.5)$$

Если задана точка $x \in R^N$, то $f(x)$ – будет ближайшей точкой для решетки Z^N . Для решетки D_N ближайшей точкой будет та из точек $f(x)$ и $g(x)$, которая имеет четную сумму координат, причем всего одна из них будет иметь четную, а другая нечетную сумму координат. Если x равноудалена от двух и более точек D_N , то в результате этой процедуры получим точку с наименьшей нормой. Так как $f(x)$ – ближайшая к x точка в Z^N , а $g(x)$ – следующая по степени близости точка, то процедура работает. Точки $f(x)$ и $g(x)$ отличаются на 1 ровно в одной координате, и поэтому только одна из сумм $\sum f(x_i)$ и $\sum g(x_i)$ четна, а другая нечетна [110]. Следует отметить, что квантование с помощью решетки Z^N проще, так как требует только вычисления $f(x)$, тогда как квантование в D_N требует вычисления $f(x)$ и $g(x)$ и выбора одного из них, с четной суммой координат.

При практическом использовании решеток для векторного квантования, необходимо произвести усечение бесконечных решеток и масштабирования. Кроме этого, необходимо построить метод для квантования тех входных точек, которые попадают за пределы области усеченной решетки. Мы будем рассматривать те точки решетки, которые лежат внутри N – мерной сферы и используем следующую процедуру усечения. Входная точка отражается на поверхности сферы вдоль ее радиальной линии, центра. Затем, находим ближайшую точку решетки, от отраженной точки. Если эта точка находится за пределами сферы, тогда проверяется близость всех соседних точек решетки к этой точке. Если одна или более точек попадают внутри сферы, то мы выбираем одну, которая находится ближе к радиальной проекции на сферу. В противном случае, находим одну из точек "ближайшего соседа", ко-

торая находится ближе всего к радиальной проекции и проверяем их ближайшие соседи. Процесс продолжается, пока не будут найдены все точки решетки.

Наилучшая процедура усечения и масштабирования окончательно осуществляется экспериментально. Так, для заданного числа точек решетки, $L = 2^{NR}$, исследовались, различные коэффициенты масштабирования и выбирался тот, который минимизировал среднеквадратическую ошибку. При использовании решетчатого квантования для квантования коэффициентов ДКП предполагалось, что коэффициенты с малыми номерами имеют распределение Гаусса, а остальные коэффициенты - распределение Лапласа. Чтобы определить уровень усечения решетки, при заданных $L = 2^{NR}$, выходных точках, мы должны вычислить число точек решетки в оболочке, на различных радиальных расстояниях от центра. Для таких вычислений используется тэта-функция [110]. Тэта функция решетки Λ определяется как

$$\theta_{\Lambda}(Z) = \sum_{m=0}^{\infty} N_m q^m, \quad (4.3.6)$$

где N_m - число точек решетки, на расстоянии m от центра.

В наших экспериментальных исследованиях [32] были использованы алгоритм ЛБГ для коэффициентов ДКП, и решетчатое квантование на основе решетки Z^N , при $N=8, 16$. Объективные качественные показатели (ПОСШ) для тестового изображения "ЛЕНА", составили 29,7 дБ, при использовании алгоритма ЛБГ для коэффициентов ДКП и, 27,5 дБ для решетчатого квантователя Z^{16} , при этом скорость квантования составила $R = 0,25$ бит/эл., а быстродействие решетчатого квантования было на порядок выше, чем при обычном алгоритме ЛБГ. Субъективная экспертиза, квантованных изображений показала, что при решетчатом квантовании несколько снижается четкость восстановленных изображений. Решетчатое квантование было также использовано для нахождения начальной кодовой книги с последующим использованием

алгоритма ЛБГ. Как показали результаты моделирования, время создания кодовой книги, при использовании начальной кодовой книги, построенной на основе решетки Z^N - в среднем сократились на 30-35%, по сравнению с тем случаем, когда начальная кодовая книга выбиралась случайным образом.

4.4. Каскадное векторное квантование ТВ изображений

Как было уже отмечено, при векторном квантовании ТВ изображений возникают сложности, связанные с вычислительными затратами и требуемым объемом памяти. Кроме этого, при векторном квантовании ТВ сигналов возникают искажения на границах соседних блоков. В предыдущих главах данной работы были исследованы вопросы сокращения специфических искажений ВК, в этом разделе исследуется один из методов сокращения специфических искажений ВК, с одновременным снижением вычислительных затрат на ВК ТВ изображений.

Общая идея каскадного ВК заключается в следующем [82,88]. Входной вектор сначала квантуется одним квантователем, а затем второй квантователь осуществляет квантование разности между входным вектором и квантованным вектором, в следующих каскадах осуществляется аналогичная процедура. На рис.4.4.1 представлена структурная схема двухкаскадного ВК. Входной вектор X_n сначала квантуется векторным квантователем ВК1 с кодовой книгой $Y_0, Y_1 \dots Y_i$, затем из входного вектора X_n вычитаются квантованные векторы Y_i . Полученная ошибка $1 = X_n - Y_i$, квантуется квантователем ВК2, с кодовой книгой $E_0, E_1 \dots E_j$. Два канальных символа далее объединяются в кодере и посылается в канал. Как отмечалось в разделе 1.5 при двухкаскадном ВК число необходимых операций вычисления уменьшается до

$$C_n = N (2^{kr_1} + 2^{kr_2}) \quad (4.4.1)$$

где r_1 и r_2 число бит в первом и втором каскадах ВК, k - размерность вектора, N - объем кодовой книги ВК.

В известных работах по векторному квантованию ТВ изображений

отсутствуют данные о том, как лучше выбрать число уровней квантования (объем квантования) и размерности блоков, в различных каскадах ВК. Для экспериментального исследования двухкаскадного ВК было использовано тестовое изображение "ЛЕНА" с размером 256x256 элементов с разрешением 8 бит/эл. Целью экспериментального исследования был выбор объема кодовых книг и размерности векторов в первом и во втором каскадах двухкаскадного ВК, при которых специфические искажения снижаются, по сравнению с обычным алгоритмом ВК ТВ изображений. При выборе объема кодовой книги и размерности кодового вектора предполагалось, использовать эффект рандомизаций квантования [35,146,147] т.е. введения в процесс квантования некоторого элемента случайности. Рандомизацию можно осуществить, например, случайным изменением координат кодового вектора. Такое случайное изменение значений координат кодового вектора, позволяет снизить искажения на границах соседних блоков восстановленных изображений. Такое снижение искажения можно объяснить тем, что искажения "ступенчатая структура" и "блочная структура" имеют грубую структуру, а глаз человека гораздо более нетерпим к шуму с такой структурой, чем к случайному шуму [146]. Поэтому, если шум с грубой структурой преобразовать в случайный шум, то можно снизить их влияние на человеческий глаз.

В наших экспериментах были использованы кодовые книги различного объема при разных размерностях кодовых векторов. В табл. 4.4.1 представлены результаты экспериментальных исследований двухкаскадного ВК. Были использованы кодовые книги с объемом 64, 128, 256 для первого каскада ВК и 64, 128 для второго каскада. Было установлено, что для использования эффекта рандомизации размерность кодового вектора в первом каскаде должна быть меньше, размерности вектора во втором каскаде. Экспериментально установлено

также, что когда размерность вектора во втором каскаде четыре раза превосходит размерность вектора в первом каскаде ВК, результаты моделирования дают наилучшие результаты (см.табл.4.4.1). В экспериментах, для второго каскада, размерность вектора была выбрана равная 8x8, а в первом каскаде 4x4. Результат был наилучшим при объеме кодовой книги 256, для ВК1 и, 64 для ВК2. Число бит на элемент изображения при двухкаскадном векторном квантовании можно представить как:

$$R = \frac{\log_2 N_1}{K_1} + \frac{\log_2 N_2}{K_2}$$

где N_1 и N_2 , K_1 и K_2 - объемы кодовых книг и размерности в первом и во втором каскадах соответственно.

Таблица 4.4.1

Кодовая книга 1	Размер блока	Кодовая книга 2	Размер блока	СКО	ОСШ	ПОСШ
256	4x4	64	8x8	19,5	28,1	35,2
256	4x4	64	4x4	66,3	23,3	29,99
128	4x4	64	8x8	113,2	22,5	28,6
64	4x4	128	8x8	198,7	18,0	25,2
256	4x4	-	-	110,7	20,6	27,7
128	4x4	-	-	146,2	19,4	26,5

На рис.4.4.2аб, представлены восстановленные изображения для а) $N_1 = 256$, $N_2 = 64$, $K_1 = 4x4$, $R = 0,8125$ бит/эл. и б) $N_1 = 256$, $N_2 = 64$, $K_1 = 4x4$, $K_2 = 8x8$, $R = 0,593$ бит/эл.

На рис.4.4.3аб представлены гистограммы трехмерных ошибок, соответствующие представленным изображениям. На основе субъективных экспертиз было установлено, что при двухкаскадном ВК, наилучшие результаты получаются когда во втором каскаде используются кодовые векторы, размерность которых в 4 раза больше, размерности векторов в первом каскаде. Субъективное улучшение восстановленных

изображений связано с эффектом рандомизации.

Поскольку в первом каскаде двухкаскадного ВК размерность блока равна 4×4 , т.е. одновременно кодируется 16 элементов исходного изображения, а во втором каскаде, кодированию подлежит сразу 64 (8×8) элемента вектора ошибки. Этот вектор по размеру охватывает четыре вектора (блока) исходного изображения. Поэтому, при добавлении вектора ошибки к изображению, квантованному с помощью ВК1, осуществляется сглаживание искажений, которые возникают когда изображение квантуется только одним каскадом ВК. Результат квантования получается лучше, когда ВК2 имеет кодовые векторы большей размерности, чем ВК1. Число кодовых векторов в первом каскаде должно быть больше, чем во втором, т.к. для квантования вектора ошибки требуется меньшее число кодовых векторов. Этот вывод хорошо согласуется также со скалярным квантованием. Как было показано во второй главе, разностный сигнал можно квантовать на меньшее число уровней, чем исходное ТВ изображение. Субъективная экспертиза ВК ТВ изображений (см. разд. 4.7) показала, что двухкаскадное ВК дает наилучшее субъективное качество восстановленных ТВ изображений.

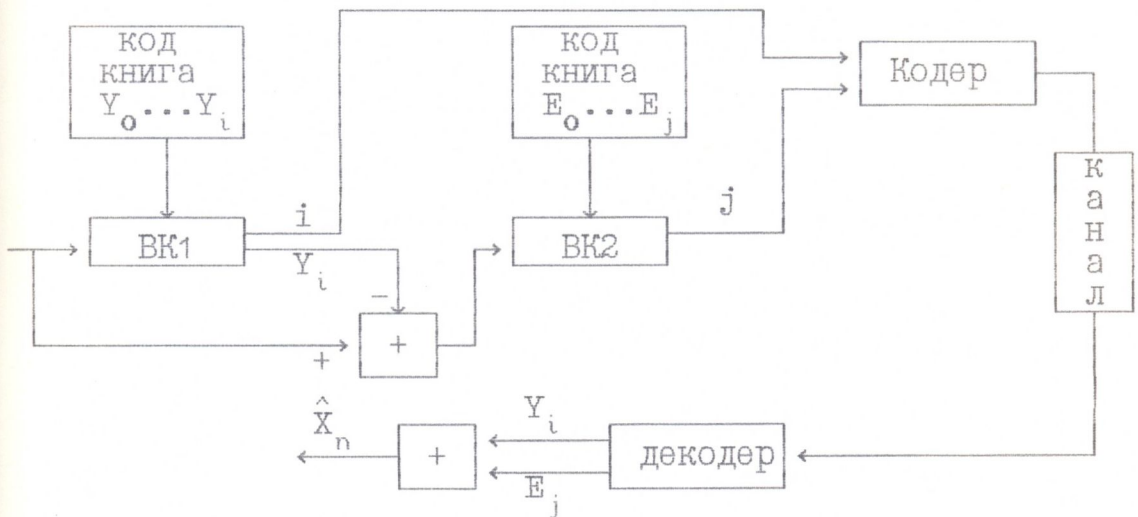


Рис.4.4.1. Структурная схема двухкаскадного ВК

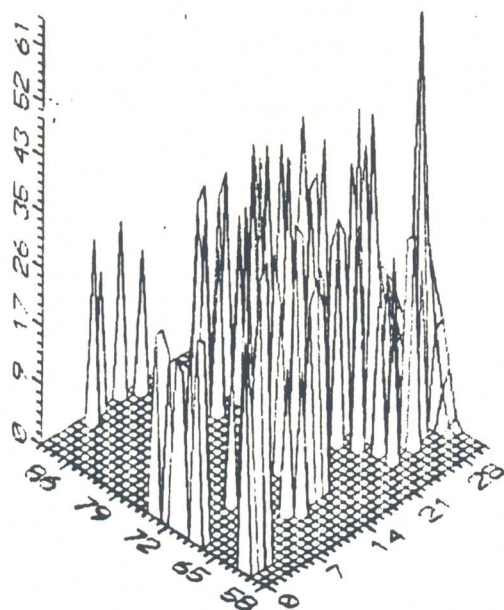


a)

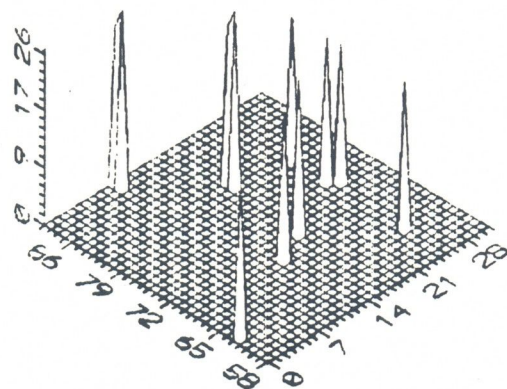


ბ)

Рис. 4.4.2 Результаты двухкаскадного ВК



a)



б)

Рис.4.4.3 Гистограмма ошибок двухкаскадного ВК

4.5. Оценка качественных и информационных характеристик при квантовании ТВ изображений

Исходя из того, что шум квантования в общем случае, является случайным процессом, для оценки качества квантования следует использовать статистическое усреднение некоторой функции ошибки. Наиболее распространенной мерой, на практике, является средне-квадратическая ошибка (СКО). Однако, в теории связи для качественной оценки, часто используется отношение сигнал-шум (ОСШ), которое, в общем случае, оценивается как

$$\text{ОСШ} = 10 \lg(\sigma^2 / \varepsilon^2) \quad (4.5.1)$$

Здесь σ^2 - дисперсия входных отсчетов, ε^2 - мощность ошибки квантования. Для ошибки квантования, при равномерной шкале, с учетом коэффициента перегрузки, $h = X_{\max} / \sigma$, можно записать выражение

$$\varepsilon^2 \approx \frac{\Delta^2}{12} = \frac{h^2 \cdot \sigma^2}{3 \cdot 2^{2n}} \quad (4.5.2)$$

где n - число кодовых разрядов ($n = \lg_2 N$). С учетом (4.5.2), для ОСШ имеем

$$\text{ОСШ} = 6,02n + 4,77 - 20 \lg h \quad (4.5.3)$$

Полученное выражение справедливо для коррелированных данных. Как показали наши экспериментальные исследования [5,32,36] выражение (4.5.3) дает заниженное значение ОСШ, когда оно используется для оценки квантования реальных ТВ изображений. На основе экспериментальных исследований, нами был найден эмпирический коэффициент поправки для оценки ОСШ, при равномерном квантовании ТВ изображений. С учетом коэффициента поправки выражение (4.5.3) принимает вид

$$\gamma_1 = 6,02n + 17,07 - 20 \lg h \quad (4.5.4)$$

Так, например, при $n = 5$ значение $\gamma_1 = 33,41$ дБ, тогда как

реальное ОСШ, тестового изображения "ЛЕНА", при квантовании на 32-уровня составляет 33,57 дБ. Ошибка квантования, при неравномерной оптимальной шкале и среднеквадратической мере искажений, согласно (2.4.6) равна

$$\varepsilon_{\text{нер}}^2 = (\sigma^2 / 12N^2) \left[\int [W(x)]^{1/3} dx \right]^3. \quad (4.5.5)$$

Для оценки ОСШ в этом случае имеем

$$\gamma_2 = 10 \lg 2^{2n} + 10 \lg \frac{12}{A^3}. \quad (4.5.6)$$

Здесь A - значение интеграла, выражении 4.5.5 зависящая только от плотности *вероятности сигнала*. Как было показано в главе 2 для пик-фактора $h > 4$ значение A - практически остается постоянной. Для плотности распределения Гаусса, значение второго слагаемого в (4.5.6) составляет - 4,35 дБ.

Для оценки ошибки векторного квантования, обычно используется выражение

$$D = (1/k) \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 \quad (4.5.7)$$

Скорость кодирования, при векторном квантовании, определяется как $B = \lg_2 N / k$. Как отмечалось в главе 1, если сравнить зависимость B от искажения D , при ВК, можно заметить, что когда длина блока k увеличивается, то минимальное значение B , для достижения заданного искажения, будет уменьшаться. В пределе когда $k \Rightarrow \infty$ минимальное значение B приближается к функции скорость-погрешность $R(D)$ [119]. Снижение числа бит на отсчет без использования ВК можно осуществить с помощью энтропийного кодирования, однако, при этом требуется буферное запоминающее устройство, для выравнивания потока двоичных единиц, что усложняет процесс кодирования. В общем случае, оптимальное квантование не обеспечивает выравнивания вероятностей выходных символов (см. главу 2), поэтому,

энтропия H всегда меньше чем, $H_{\max} = \lg_2 N$. Так, при квантовании сигнала с распределением Гаусса на 32 уровня оптимальной шкалы, энтропия составляет 4,73 бит [65], а для кодирования такого сигнала равномерным кодом требуется 5 бит на отсчет. Таким образом, при энтропийном кодировании не выгодно производить оптимальное неравномерное квантование. Из теории скорость-погрешность известно, что при блочном квантовании, когда длина блока приближается к бесконечности, скорость кодирования для гауссовского источника с независимыми значениями может достигнуть значения

$$B = (1/2) \lg_2 \sigma^2/D \quad . \quad (4.5.8)$$

При этом для ОСШ будем иметь

$$\gamma_3 = 6,02 \text{ В} \quad . \quad (4.5.9)$$

Это значение ОСШ является нижним достижимым пределом для любого квантователя не зависимо от плотности распределения вероятностей сигнала, если отсчеты независимы. Если отсчеты зависимы ОСШ можно увеличить [32,119].

Если использовать равномерное квантование в сочетании с энтропийным кодированием выходных символов, то можно достигнуть теоретически эффективного квантования. В работе [170] было показано, что при равномерном квантовании можно достигнуть наивысшей выходной энтропии (см.раздел 2.2), которая равна

$$H^* = \frac{1}{4} + \frac{2}{2} \lg_2 \left(\frac{\sigma^2}{D} \right) \quad . \quad (4.5.10)$$

При энтропийном кодировании достижимая скорость кодирования может быть приравнена к энтропии H^* так, что для ОСШ получаем

$$\gamma_4 = 6,02 \text{ В} - 1,5 \quad . \quad (4.5.11)$$

Таким образом равномерное квантование с энтропийным кодированием обеспечивает ОСШ лишь на 1,5 дБ ниже, чем определяется нижней

границей, при блочном квантовании. Если использовать оптимальное неравномерное квантование с энтропийным кодированием и принимая энтропию в качестве скорости кодирования, для ОСШ получим [171]

$$\gamma_5 = 6,02B - 2,45 \quad , \quad (4.5.12)$$

где коэффициент 2.45 найден из таблицы Макса [65].

Сравнивая выражения (4.5.11) и (4.5.12) позволяют заключить, что при энтропийном кодировании неэффективно использовать неравномерное квантование. Как отмечалось выше, неравномерное квантование без энтропийного кодирования обеспечивает ОСШ равное

$$\gamma_6 = 6,02B - 4,35 \quad . \quad (4.5.13)$$

Если использовать равномерное квантование без энтропийного кодирования, то из выражения (4.5.6), и при $h=4$, без учета шумов перегрузки, получим

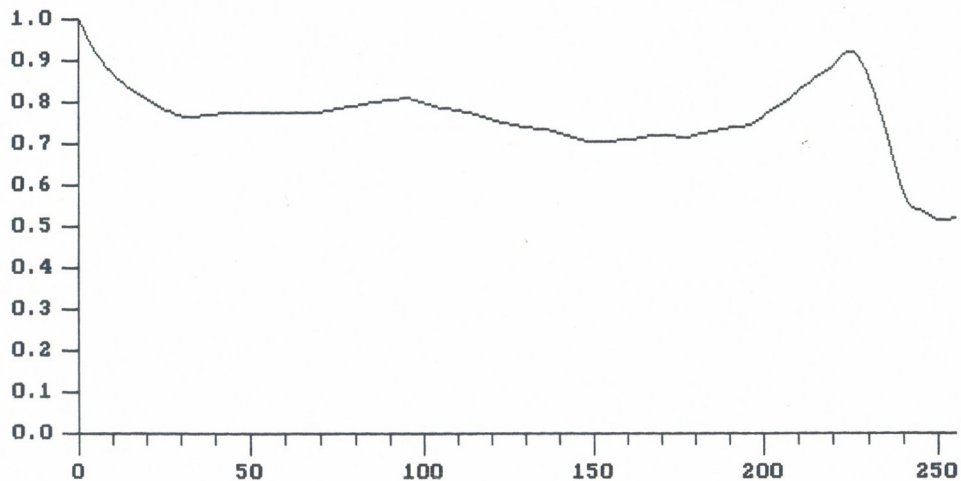
$$\gamma_7 = 6,02B - 7,3 \quad (4.5.14)$$

Таким образом при равномерном квантовании без энтропийного кодирования, ОСШ на 7,3 дБ меньше, чем при блочном квантовании. Однако, этот теоретический вывод справедлив только для Гаусовского независимого источника. Реальные ТВ изображения содержат большую избыточность и, при векторном квантовании изображений, практический выигрыш получается значительно выше, чем оценка по формуле (4.5.14). Как показали наши экспериментальные исследования [32], векторное квантование ТВ изображений дает ОСШ на 12 дБ ниже, чем векторное квантование. Так, например, квантование тестового изображения "ЛЕНА" на 2 уровня (т.е. при 1 бит/отсчет) дает ОСШ равное 9,6 дБ, тогда как, векторное квантование того же изображения при $R = 1$ бит/эл. ОСШ составляет 21,59 дБ, что на 12 дБ больше, чем при скалярном квантовании. Следует отметить, также, что характеристики ВК намного превышают характеристики скалярного квантования, при

скорости кодирования ниже одного бит/эл. При этих скоростях характеристики ВК практически невозможно сравнить с характеристиками скалярного квантования ТВ изображений.

Для оценки эффективности квантования ТВ изображений, целесообразно исследовать такие статистические и информационные характеристики, знание которых позволяют оценить потенциальную эффективность квантования. Одной из важных статистических характеристик ТВ изображений является функция корреляции. Нами экспериментально исследованы функции корреляции как для исходных, так и для квантованных изображений. На рис.4.5.1а,б показаны нормированные усредненные функции автокорреляции тестового изображения "ЛЕНА" и изображения квантованного на 8-уровней равномерной шкалой, соответственно. Была исследована корреляция, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Установлено, что коэффициент корреляции практически не меняется, как после скалярного квантования (для $N > 8$), так и после векторного квантования. Была также исследована взаимная корреляция между исходным и квантованными изображениями. На рис.4.5.2а,б представлены функции взаимной корреляции между исходным и квантованным изображениями. Рис.4.5.2а соответствует ВК с Вейвлет преобразованием. Представленные функции практически идентичны и показывают высокую степень взаимной корреляции между исходными и квантованными изображениями. Были также исследованы средние значения и среднеквадратические значения квантуемых изображений. Установлено, что эти параметры так же как и функции корреляции после квантования меняются незначительно и их использование для оценки качества восстановленных ТВ изображений не представляется возможным.

Одной из важных информационных характеристик является энтропия квантованного изображения. В известных в настоящее время рабо-



Auto Correlation for lenna.obr

Рис. 4.5.1а Функция автокорреляции тестового изображения.

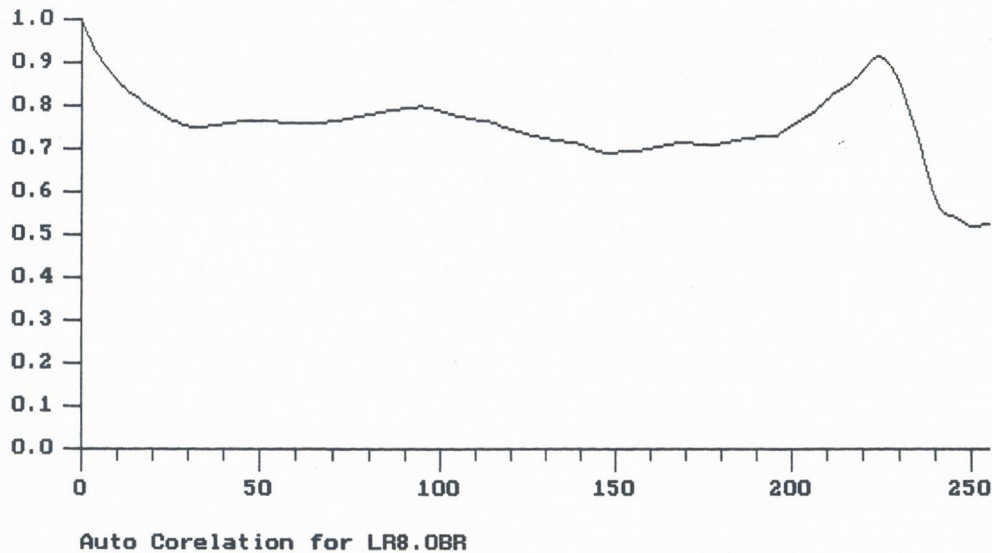
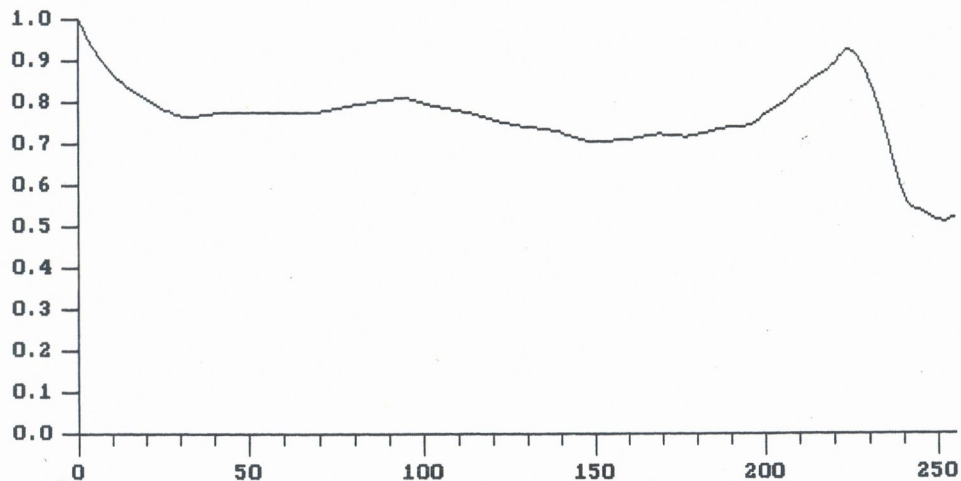


Рис. 4.5.16 Функция автокорреляции для изображения после ВК
 (на основе алгоритма ЛБГ).



Corelation for Lenna.OBR and MT64_8.OBR

Рис. 4.5.2а Функция взаимной корреляции между исходным и
 квантованным (двухкаскадное ВК) изображениями.

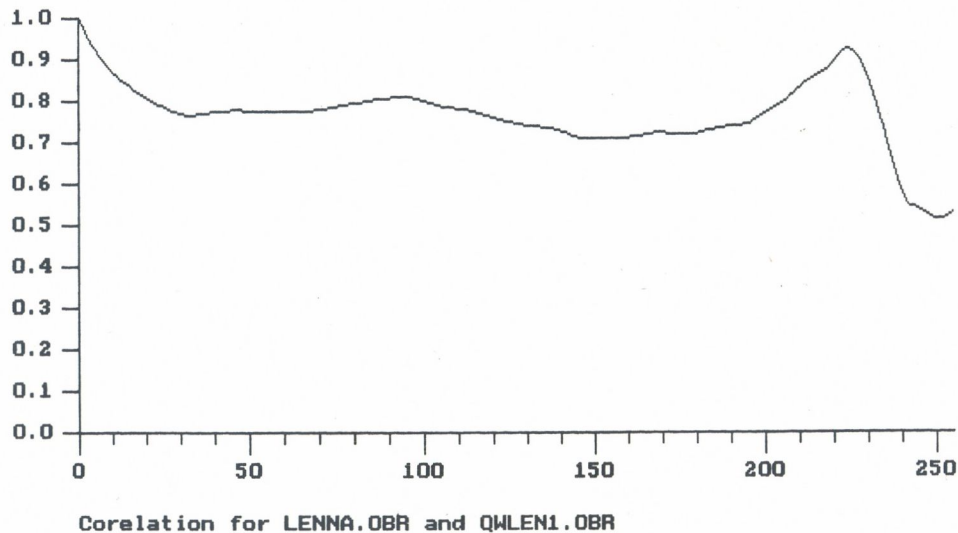


Рис. 4.5.2б Функция взаимной корреляции между исходным и
 квантованным (ВК с Вейвлет преобразованием)
 изображениями.

тах по ВК ТВ изображений отсутствовали данные об исследовании энтропии различного порядка. В особенности это касается исследований совместных и условных энтропий квантованных изображений. Нами были исследованы [36] безусловная $H(X)$ совместная $H(X,Y)$ и условная $H(Y|X)$ энтропий для исходных и квантованных изображений. В таблице 4.5.1 представлены результаты экспериментальных исследований. Как видно из таблицы 4.5.1, например, для тестового изображения "ЛЕНА" $H(X) = 7,59$ бит, $H(X,Y) = 12,79$ бит, а $H(Y|X) = 5,19$ бит. Для того же изображения, после векторного квантования (при $N = 4 \times 4$) эти же характеристики изменились следующим образом: $H(X) = 7,17$ бит, $H(X,Y) = 8,79$ бит и $H(Y|X) = 1,61$ бит. Из анализа данных, представленных в таблице 4.5.1 следует, что ВК наибольшее влияние оказывает на совместную и условную энтропий. Так, для ВК (табл.4.5.1, LENNOR. OBR.) относительное изменение безусловной энтропии составил 0,26%, для совместной - 1,92% и для условной - 4,42%. Для сравнения отметим, что для обычного алгоритма ВК (LENLBG.OBR. табл.4.5.1) эти изменения энтропии составляют 5,4%, 20,4% и 41,6%, соответственно. На основе экспериментально полученных данных оценивалась полная статистическая избыточность, на основе выражения

$$D = D_1 + D_2 - D_1 \cdot D_2, \quad (4.5.15)$$

где $D_1 = 1 - H(Y|X) / H(X)$ - избыточность, за счет статистических связей, и $D_2 = 1 - H(X) / H_{\max}$, избыточность, за счет неравномерности распределения ($H_{\max} = 8$ бит). На основе полученных экспериментальных результатов были оценены значения коэффициентов сжатия, которые можно получить если использовать соответствующую энтропию. Так, например, коэффициент K_1 , показывает то значение сжатия, в процентах, которое можно получить с использованием безусловной энтропии т.е.

$$K_1 = \frac{H_{\max} - H(Y)}{H_{\max}} \cdot 100 \% \quad (4.5.16)$$

Аналогично определяются и коэффициенты K_2 и K_{12} , используя совместную и условную энтропии, соответственно. Анализ результатов вычисления коэффициентов K_1 , K_2 и K_{12} , показывает, что наибольшая возможность сжатия заключается при использовании условной энтропии. Так, например, при двухкаскадном ВК $K_1 = 4,98\%$, $K_2 = 18,28\%$ и $K_{12} = 33,59\%$.

Как было уже отмечено, корреляционные функции квантованных изображений не позволяют оценить на сколько "близки" квантованные изображения к исходным неквантованным. С другой стороны, с целью оценки "близости" квантованных изображений к исходным, можно использовать другие меры связи основанные на информационных характеристиках изображения. Такие меры связи могут оценить, насколько восстановленные изображения зависимы (или определяются) от исходных изображений (неквантованных). Для практического применения наиболее удобно использовать меры, верхний предел изменения которых, равен единице. Нулевое значение меры связи будет означать, что переменные X (значения исходного изображения) и Y (значения квантованного изображения) независимы. При полной связи между X и Y следует говорить тогда, когда значение X устраняет всякую неопределенность того, какое значение принимает Y . Одной из таких информационных мер связи является мера [173]

$$R_{Y/X} = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{H(Y)} = \frac{I(X,Y)}{H(Y)} \quad (4.5.17)$$

основанная на информационной статистике Шеннона. Здесь $H(Y)$ - энтропия квантованного изображения, $H(Y|X)$ - условная энтропия Y , $I(X,Y)$ есть величина количества информации. Она может служить и самостоятельной мерой связи. К такой мере связи относится, инфор-

информационный коэффициент корреляции [36,173]

$$R(X,Y) = \sqrt{1 - e^{-2I(X,Y)}} \quad , \quad (4.5.18)$$

который в отличие от обычного коэффициента корреляции, равен единице только при полной статистической связи и равен нулю, когда переменные независимы. Коэффициент информационной связи $R_{Y/X}$ обладает следующими свойствами: 1) $0 \leq R_{Y/X} \leq 1$, 2) $R_{Y/X} = 0$, если переменные независимы, 3) $R_{Y/X} = 1$, если между X и Y имеет место полная функциональная связь. Следует отметить, что $R_{Y/X} \neq R_{X/Y}$, т.е. мера $R_{Y/X}$ асимметрична. Симметризованный вариант такой меры имеет вид [172]

$$R_c = \frac{2 I(X,Y)}{H(X) + H(Y)} \quad . \quad (4.5.19)$$

На базе $I(X,Y)$ можно построить измеритель связи, имеющий смысл показателя влияния X на Y

$$\Gamma_{yx} = \frac{I(X,Y)}{H(X)} = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{H(X)} \quad . \quad (4.5.20)$$

Из выражения следует ясная интерпретация Γ_{yx} как относительного показателя детерминации Y от X , указывающего какую долю энтропии квантованного изображения (переменная Y) определяет энтропия исходного изображения (переменная X). Последнее соотношение может быть записано также в форме

$$\frac{I(X,Y)}{H(Y)} = \Gamma_{yx} \frac{H(X)}{H(Y)} \quad (4.5.21)$$

т.е. относительная редукция неопределенности квантованного изображения (Y), связанная с воздействием исходного изображения (X) пропорциональна относительной энтропии исходного изображения (X). Таким образом последнее выражение является показателем влияния исходного изображения на квантованное изображение. Другими словами этот коэффициент можно использовать как показатель того, насколько

восстановленное изображение определено исходным изображением, т.е. позволяет измерить "близость" между исходным и квантованными изображениями.

Коэффициент Γ_{yx} имеет следующие свойства: 1) при статистической независимости Y и X , $\Gamma_{yx}=0$, 2) $\Gamma_{yx}=1$ в случае строгой детерминированности Y от X , 3) в силу того, что $I(X,Y) \leq \min\{H(X), H(Y)\}$, если исходное изображение имеет собственную статистическую неопределенность $H(X)$ большую, чем безусловная энтропия $H(Y)$, невозможно влияние $X \Rightarrow Y$ с интенсивностью равной единице.

Для определения эффективности векторного квантования нами была исследована энтропия блоков изображения после векторного квантования. Как известно, при статистическом кодировании число бит на элемент изображения должен совпадать с энтропией. Чтобы оценить насколько векторное квантование приближается к энтропийному кодированию, была исследована энтропия кодовых векторов, квантованных ТВ изображений. Так, например, для изображения, квантованного на основе классифицированного алгоритма ВК (см.раздел 3.5), при размерности блока изображения $k = 4 \times 4$, объеме кодовой книги $N = 512$, энтропия кодовых векторов составила 8,56 бит. При этом для передачи всех кодовых векторов требуется 9 бит на вектор. Таким образом если использовать энтропийное кодирование кодовых векторов, потребуется в среднем 8,56 бит на вектор, а при векторном квантовании это число составляет 9 бит, т.е. эта величина на 0,44 бит больше, чем при энтропийном кодировании векторов. При пересчете на каждый элемент это число составляет 0,0275 бит/эл. Если учитывать, что для статистически оптимального кодирования требуется дополнительное буферное запоминающее устройство, то можно заключить, что векторное квантование является хорошим приближением к энтропийному кодированию.

В табл.4.5.1 представлены статистические и информационные характеристики исходного и квантованного изображений. Кроме вышеперечисленных характеристик, в табл. 4.5.1 представлены такие информационные характеристики, как $H(X,Y)$, $I(X,Y)$, $H(Y|X)$ и $H(X-Y)$ и некоторые были использованы в разделе 2.2.

Анализ экспериментальных данных представлены в таблице 2.5.1 (более обширная таблица представлена в Приложении 1.) позволяет заключить, что наиболее хорошими показателями оценки "близость" исходного и квантованного изображений являются коэффициент влияния Γ_{yx} , и симметризованный коэффициент R_c . Что касается информационных характеристик, с этой точки зрения, следует выделить количество информации $I(X,Y)$ и энтропию разности $H(X-Y)$. Чем "ближе" вышеотмеченные характеристики друг к другу, тем схожи отношение сигнал-шум и субъективное качество этих квантованных изображений. С точки зрения оценки статистической взаимосвязи, наилучшими характеристиками следует считать коэффициенты Γ_{yx} и R_c . Наиболее "неинформативной", с этой точки зрения является информационный коэффициент корреляции. Как видно из таблицы 4.5.1 этот коэффициент практически мало изменяется для различных квантованных изображений, что затрудняет оценку статистической зависимости изображений на основе $R(X,Y)$. Что касается коэффициента Γ_{yx} , то его значения довольно хорошо согласуются, как с оценкой ОСШ, так и с результатами субъективно-статистических экспертиз.

Таблица 4.5.1



Name	H(y)	H(y1,y2)	H(x,y)	H(y/x)	K1	K2	K12
LR2.OBR	0.887816	1.239344	7.593151	0.000000	88.902305	92.254101	95.605898
LR8.OBR	2.701256	4.062954	7.593151	0.000000	66.234300	74.606538	82.978775
LR32.OBR	4.608050	7.460186	7.593151	0.000000	42.399372	53.373836	64.348300
LCOSVQ.OBR	7.559536	12.263786	12.654015	5.060864	5.505794	23.351338	41.196882
L44_MM.OBR	7.112992	10.132137	12.346504	4.753353	11.087604	36.674143	62.260681
L44QUICK.OBR	7.185662	10.400850	12.222520	4.629369	10.179229	34.994688	59.810147
MAE.OBR	7.529537	12.176519	11.949479	4.356329	5.880786	23.896759	41.912733
LENAROM.OBR	7.121311	10.431313	12.111338	4.518187	10.983617	34.804291	58.624966
LENN_A.OBR	7.575356	12.759267	12.074784	4.481634	5.308045	20.254579	35.201112
ZON.OBR	7.590398	12.590430	11.115400	3.522250	5.120021	21.309810	37.499599
LENLBG.OBR	7.188456	10.358621	12.213280	4.620129	10.144300	35.258621	60.372942
LOVLAPIP.OBR	7.262627	10.914454	12.136625	4.543474	9.217161	31.784664	54.352166
MT64_8.OBR	7.601086	13.073639	11.378535	3.785385	4.986423	18.289758	31.593094
MULTI-VQ.OBR	7.567662	12.647326	12.171373	4.578222	5.404228	20.954211	36.504194
L1024CLS.OBR	7.483178	12.038238	11.961287	4.368136	6.460280	24.761015	43.061751
QWLEN1H.OBR	7.632901	12.982123	12.231940	4.638789	4.588737	18.861733	33.134730
QWLEN1H2.OBR	7.630368	12.952695	12.277188	4.684037	4.620397	19.045657	33.470918

Таблица 4.5.1 (продолжение)



Name	I(x,y)	H(x-y)	M	Sigma	Gamma1	Gamma3	D
LR2.OBR	0.887816	6.965788	102.093750	58.954887	9.676100	10.774324	0.956059
LR8.OBR	2.701256	4.996853	98.321289	54.355603	21.536130	0.702081	0.829788
LR32.OBR	4.608050	2.998945	98.512573	52.908398	33.575032	0.043903	0.643483
LCOSVQ.OBR	2.498672	5.464976	99.008011	50.823897	17.953495	1.601956	0.411969
L44_MM.OBR	2.359638	5.567211	99.017181	50.650615	18.367591	1.456267	0.622607
L44QUICK.OBR	2.556293	5.378764	98.542847	51.681422	16.943366	2.021452	0.598101
MAE.OBR	3.173208	4.662650	98.893463	52.345210	22.544417	0.556619	0.419127
LENAROM.OBR	2.603123	5.302577	98.718689	51.640251	19.721379	1.066257	0.586250
LENNANO.OBR	3.093723	4.771622	98.508713	51.804826	21.707138	0.674973	0.352011
ZDN.OBR	4.068149	3.708312	99.000626	52.657517	27.959077	0.159990	0.374996
LENLB6.OBR	2.568327	5.333062	98.632080	51.508883	19.525198	1.115527	0.603729
LOVLAPIP.OBR	2.719153	5.174131	98.566666	51.310302	20.441974	0.903239	0.543522
MT64_8.OBR	3.815702	3.925391	98.679703	52.661072	28.112506	0.154436	0.315931
MULTI-VQ.OBR	2.989440	4.830906	98.993698	52.271612	22.786260	0.526470	0.365042
L1024CLS.OBR	3.115042	4.735704	98.657028	52.158607	22.645872	0.543767	0.430618
QWLEN1H.OBR	2.994112	4.870992	99.034012	52.751300	22.624547	0.546444	0.331347
QWLEN1H2.OBR	2.946331	4.928893	99.032074	52.651289	22.068418	0.621095	0.334709

Таблица 4.5.1 (продолжение)

Name	D1	D2	R(x,y)	R(y1,y2)	Бyx	Ry/x	Rc
LR2.OBR	0.604053	0.889023	0.911385	0.811094	0.116923	1.000000	0.209367
LR8.OBR	0.495902	0.662343	0.997745	0.965078	0.355749	1.000000	0.524801
LR32.OBR	0.381054	0.423994	0.999950	0.984966	0.606869	1.000000	0.755344
LCOSVQ.OBR	0.377707	0.055058	0.996616	0.998343	0.329069	0.330532	0.329799
L44_MM.OBR	0.575545	0.110876	0.995529	0.999861	0.310759	0.331736	0.320905
L44QUICK.OBR	0.552555	0.101792	0.996985	0.999822	0.336658	0.355749	0.345940
MAE.OBR	0.382833	0.058808	0.999123	0.998431	0.417904	0.421435	0.419662
LENAROM.OBR	0.535198	0.109836	0.997255	0.999755	0.342825	0.365540	0.353818
LENNANO.OBR	0.315688	0.053080	0.998972	0.995805	0.407436	0.408393	0.407914
ZON.OBR	0.341269	0.051200	0.999854	0.997184	0.535766	0.535960	0.535863
LENLBG.OBR	0.558992	0.101443	0.997057	0.999838	0.338243	0.357285	0.347503
LOVLAPIP.OBR	0.497176	0.092172	0.997824	0.999635	0.358106	0.374404	0.366073
MT64_B.OBR	0.280030	0.049864	0.999757	0.992893	0.502519	0.501994	0.502256
MULTI-VQ.OBR	0.328767	0.054042	0.998733	0.996543	0.393702	0.395028	0.394364
L1024CLS.OBR	0.391293	0.064603	0.999015	0.998568	0.410244	0.416273	0.413236
QWLEN1H.OBR	0.299189	0.045887	0.998745	0.994794	0.394317	0.392264	0.393288
QWLEN1H2.OBR	0.302481	0.046204	0.998619	0.995042	0.388025	0.386132	0.387076

В таблице 4.5.1 использованы следующие обозначения:

- LR2, LR8, LR32- тестовое изображение "ЛЕНА" квантованное равномерной шкалой на 2,8, и 32 уровня, соответственно;
- LCOSVQ - векторное квантование с дискретным косинус преобразованием;
- L44_MM - векторное квантование при $K = 4 \times 4$, $N = 128$, при критерии минимакса;
- L.44QUICK - векторное квантование при быстром алгоритме поиска кодовой книги;
- MAE - векторное квантование на основе критерия минимума абсолютной ошибки (MAE);
- LENAROM - векторные квантования блоками ромбовидной формы;
- LENNA_NO - квантование на основе сочетания векторного и скалярного квантований (метод нормирования);
- ZON - дискретное косинус преобразование в сочетании с адаптивным классифицированным ВК;
- LENLBG - ВК на основе обычного алгоритма ЛБГ;
- LOVLARIP - ВК с перекрытием и интерполяцией;
- MT64-8 - двухкаскадное ВК с кодовыми книгами: $N_1 = 256$, $N_2 = 64$, $K_1 = 4 \times 4$, $R = 8125$ бит/эл.;
- MULTI-VQ - $N_1 = 256$, $N_2 = 64$, $K_1 = 4 \times 4$, $K_2 = 8 \times 8$, $R = 0,593$ бит/эл;
- L1024.CKS - классифицированное ВК при $N_1 = 1024$;
- m - математическое ожидание;
- σ - среднеквадратическое значение;
- σ^2 (sigma) - дисперсия;
- Gamma 1 - ОСШ, Gamma 2 - ПОСШ, Gamma 3 - СКО в процентах;
- D - коэффициент полной избыточности;
- D_1 - избыточность за счет статистических связей;
- D_2 - избыточность за счет неравномерности распределения;
- $R(Y_1, Y_2)$ - коэффициент корреляции квантованного изображения;
- G_{yx} - информационный коэффициент влияния X на Y , (выраж.4.5.20, 4.5.21);
- $R(X, Y)$ - информационный коэффициент корреляции (выраж. 4.5.18);
- $R_{y/x}$ - информационная мера связи (выраж. 4.5.17);
- R_c - информационный коэффициент корреляции (выраж.4.5.19);
- $H(X, Y)$ - взаимная энтропия между исходным и квантованным изображениями;
- $H(Y/X)$, $H(X/Y)$ - условие энтропии между исходным и квантованным изображениями;

- K_1 - коэффициент (на основе выраж. 4.5.16);
- K_2 - коэффициент (на основе 4.5.16 с учетом совместной энтропии);
- K_{12} - коэффициент (на основе 4.5.16, с учетом условной энтропии);
- $I(X, Y)$ - количество взаимной информации между исходным и квантованным изображениями;
- $I(Y_1, Y_2)$ - количество информации в одном кадре ТВ изображения;
- $H(X-Y)$ - энтропия разности (между исходным и квантованным изображениями);

4.6. Результаты субъективно-статистических экспертиз векторного квантования ТВ изображений

При экспериментальном исследовании эффективного кодирования ТВ изображений с векторным квантованием оценивалось в соответствии с методикой, которая определена рядом документов МККР [174,178] и ГОСТ 26320-84.

В качестве наблюдателей (экспертов) были привлечены 23 человека. Из них 8 специалистов, работающих в области цифрового кодирования ТВ сигналов и 15 наблюдателей, не имеющих профессиональной подготовки в этой области. Все участники экспериментов, перед проведением испытаний, были ознакомлены с целью экспериментов, исходными последовательностями ТВ изображений, шкалой оценок и методикой испытаний. Из трех шкал оценок, рекомендованных МККР была выбрана шкала сравнения. Условия наблюдений были регламентированы в соответствии с 500 рекомендацией МККР [175] и ГОСТ 26320-84, которые состоят в следующем:

- расстояние наблюдений $6H$ (где H - высота ТВ изображения), что исключает заметность строчной структуры ТВ изображений;
- максимальная яркость ТВ экрана 40 кд/м^2 ;
- отношение яркости экрана, при выключенном токе электронного пучка к максимальной яркости в белом должна быть не более 0,02;
- отношение телесного угла той части фона, которая соответствует данным требованиям, к телесному углу ТВ изображения не менее 9;
- отношение яркости фона к максимальной яркости ТВ изображения не более 0,1;
- цвет фона - серый;
- освещенность остальной части помещения при включенном вос-

производящем устройстве - от 5 до 10 лк.

Эти условия поддерживались на протяжении всех экспериментов и случаи их нарушений обязательно отмечались. Некоторое затруднение, связанное со сложностью соблюдения указанных условий при одном мониторе и числе участников больше трех, было обойдено увеличением числа ТВ мониторов.

Перед началом эксперимента был проведен предварительный сеанс, в процессе которого наблюдателям пояснились диапазоны и виды искажений.

В каждом сеансе предъявлялись исходные и векторно квантованные ТВ изображения.

В течении каждого сеанса субъективно-статистического эксперимента сначала наблюдателям в течении 30 секунд передавались исходные ТВ изображения, далее в течении 5-и секунд на экране монитора высвечивался серый фон. После этого в течении 30 секунд эксперты наблюдали восстановленные после ВК ТВ изображения. При этом наблюдателям не были известны методы ВК. Затем, для фиксации оценки наблюдателям давалось 10 секунд, на протяжении которых на экране монитора воспроизводился серый фон (яркость фона не более 0,3 максимальной яркости экрана).

Для контроля внимательности наблюдателей в процессе экспериментов несколько раз в качестве испытательного ТВ изображения предъявлялись исходные изображения, не предупреждая об этом наблюдателей.

Средняя оценка субъективно-статистической экспертизы определялась на основе выражения [175]:

$$\bar{q} = \frac{1}{MNL} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L q_{nml} \quad (4.6.1)$$

где N - число наблюдателей;

M - число испытательных ТВ изображений;

L - число предъявлений каждого изображения;

n - номер наблюдателя;

m - номер испытательного ТВ изображения;

l - номер предъявления;

q_{nml} - оценка m -го испытательного изображения n -м наблюдателем.

Результаты субъективно-статистических экспертиз оценки качества воспроизведения ТВ изображений приведены в табл. 4.6.1.

Сравнение приведенных в таблице результатов показывает, что качество восстановленных ТВ изображений при использовании интерполяционного ВК дает лучшие результаты для неподвижных ТВ изображений. Для последовательности ТВ изображений наилучшие результаты достигаются при кодировании трехмерными блоками. В таблице 4.6.1 приведены результаты субъективных экспертиз по 7-бальной шкале сравнения с оригиналом [45]. Шкала сравнения использует следующие обозначения: +3 - намного лучше, +2 - лучше, +1 - немного лучше, 0 - одинаково, -1 - немного хуже, -3 - намного хуже. Субъективная экспертиза проводилась также по шкале ухудшения.

Анализ данных табл. 4.6.1 показывает, что наилучшие результаты, с точки зрения субъективно-статистической экспертизы получены для двух-каскадного ВК, когда размер блока, во втором каскаде, четыре раза превосходит размер блока в первом каскаде двухкаскадного ВК. Векторное квантование с адаптивным косинус преобразованием дает результаты на 0,2 балла хуже, чем двухкаскадное ВК. Субъективная оценка ТВ изображений, восстановленных с помощью трехмерных блоков, составляла 4-4,5 балла, а для двухкаскадного ВК эта оценка составляет 4,9 балла, по пятибальной шкале ухудшения МККР.

Таблица 4.6.1

№ п/п	Методы векторного квантования	Оценка
1	Обычный алгоритм ВК	-2,3 (2,7)
2	Интерполяционное ВК	-1,2 (3,8)
3	Классифицированное ВК	-0,75 (4,25)
4	ВК с Вейвлет преобразованием	-0,3 (4,7)
5	ВК с косинус преобразованием	-0,2 (4,8)
6	Двухкаскадное ВК	-0,1 (4,9)
7	Трехмерное ВК для последовательности ТВ изображений	-0,5 (4,5)
8	Двухмерное ВК для последовательности ТВ изображений	-2,5 (2,5)
9	Нормированное ВК	-0,35 (4,65)

В таблице 4.6.1 в скобках представлены соответствующие оценки по пяти бальной шкале.

4.7. Экспериментальное исследование скалярного квантования для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи

В настоящее время удельный вес спутниковых каналов связи в сети передачи телевизионных сигналов значительно возрастает, что связано с необходимостью увеличения количества спутниковых каналов для передачи телевидения и уплотнения ствола в ИСЗ несколькими телевизионными программами.

Результаты диссертационной работы по скалярному квантованию были использованы при разработке кодека на скорость 24 Мбит/с, являющегося составной частью аппаратуры для передачи двух ТВ программ в одном стволе ИСЗ. В кодеке использованы квантователи, параметры которых рассчитаны на основе исследований, проведенных автором и изложенных в данной диссертационной работе. В частности, параметры квантования адаптивного квантователя (который несколько более подробно будет рассмотрен ниже) были рассчитаны по методике, изложенной в главе 2. Параметры квантования сигналов цветности были выбраны в соответствии с методикой разделов 2.8 - 2.9. Это обеспечило оптимальность и робастность квантования цветоразностных составляющих и позволило обойтись без адаптации процесса квантования в канале цветности.

В кодеке использован отдельный метод цифрового кодирования составляющих полного цветового ТВ сигнала. Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму и обратное их восстановление на приемной стороне осуществляется на основе внутрикадровой адаптивной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (АДИКМ).

Требуемый цифровой поток в 24 Мбит/с создается сочетанием трехразрядной оптимизированной и адаптивной ДИКМ с эффективной

временной дискретизацией (с шахматным расположением отсчетов в кадре) при частоте дискретизации 8 МГц для яркостной составляющей полного ТВ сигнала системы СЕКАМ и 1,6 МГц – для цветоразностных составляющих. Восстановление пропущенных отсчетов на приемной стороне системы осуществляется адаптивной пространственной фильтрацией [45].

Для повышения эффективности процесса квантования в кодере ДИКМ применен адаптивный квантователь, реализующий так называемый "зоновый" метод адаптации [54]. Для уменьшения заметности специфических искажений, сопутствующих процессу квантования, его оптимизация производится на основе методики, предложенной в разделе 2.8 главы 2 данной диссертационной работы. Кроме того, с целью устранения искажений, характерных для "зонового" квантования, используется модификация этого метода, в которой учтены эффекты пространственного маскирования [52]. В результате удалось обеспечить достаточно хорошие показатели 16-уровневого оптимизированного квантования при 3 бита на отсчет сигнала изображения. Что касается процесса предсказания, то адаптация его в кодеке ДИКМ осуществляется на основе так называемого метода "контурного слежения". На этапе обнаружения контуров применяется пороговое детектирование; параметризация контура (т.е. определение угла его наклона) производится на базе метода оценочных функций, а на этапе собственно предсказания используются двумерные алгоритмы предсказания. В итоге такой адаптации получается дополнительный выигрыш в величине сигнал-шум 4...5 дБ по сравнению с "наилучшим неадаптивным предсказанием".

С целью дальнейшего повышения качественных показателей процесса цифрового кодирования в системе применен адаптивный шумоподавитель, осуществляющий усреднение смежных элементов двух кадров ТВ

изображения с адаптацией процесса принятия решения в детекторе движения.

В результате перечисленных мероприятий удалось в основном обеспечить качественные показатели 8-разрядной ИКМ при 3 бит на отсчет, что в сочетании с эффективной дискретизацией и привело к созданию требуемого цифрового потока 24 Мбит/с. Структурные схемы кодера и декодера АДИКМ ТВ сигналов приведены на рис.4.7.1 и рис.4.7.2 соответственно. В состав кодека входят: аналого-цифровые АЦП и цифроаналоговые ЦАП преобразователи сигналов яркостей (Y) и цветоразностных (D_R и D_B) составляющих полного ТВ сигнала системы СЕКАМ; вычитающие устройства ВУ; адаптивные квантователи, содержащие собственно квантователи КВ, дешифраторы Дш1, Дш2 и кодеры зон КЗ; адаптивные предсказатели Пр, включающие в себя пороговые детекторы ПД, определители угла наклона контура ОУН и двумерные предсказатели ДПр; адаптивные двумерные интерполирующие фильтры АДИФ; передающий и приемный синхрогенераторы С1 и С2; мультиплексор М и демультимплексор ДМ. Одной из отличительных особенностей рассматриваемого кодека является использование цифрового адаптивного шумоподавителя ЦАШ, включаемого на выходе декодера АДИКМ.

Принцип действия ЦАШ заключается в следующем. Сигнал с цифрового выхода ЦВ яркостного канала подается на один из входов ВУ, на второй вход которого поступает сигнал с кадровой задержки ЗК. Выходные сигналы ВУ подаются на коммутатор К непосредственно и через ослабитель О. Кроме того, сигнал с ВУ поступает на детектор движения ДД. В последнем на основе анализа блока элементов (в непосредственном окружении данного предсказываемого элемента) и сравнения среднего значения интенсивности этих элементов с некоторым порогом выносится решение о наличии или отсутствии движения в данной области кадра ТВ изображения.

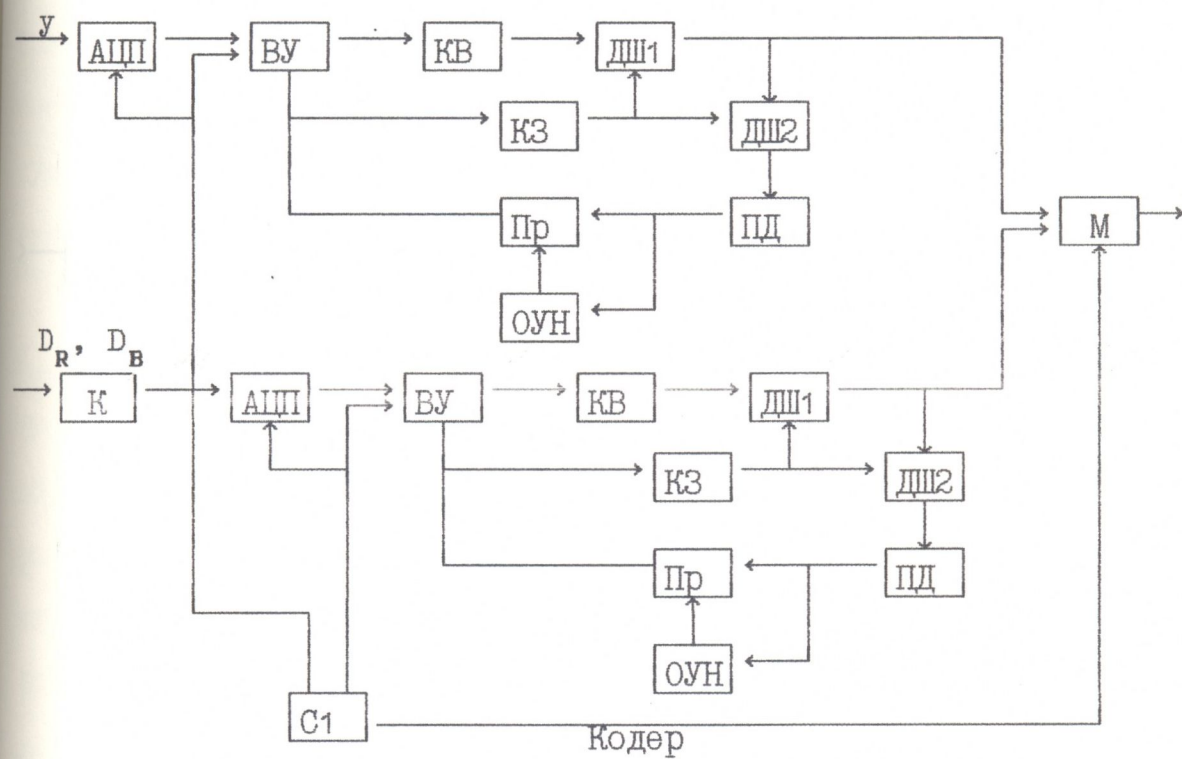


Рис. 4.7.1 Структурная схема кодера АДИКМ ТВ сигналов

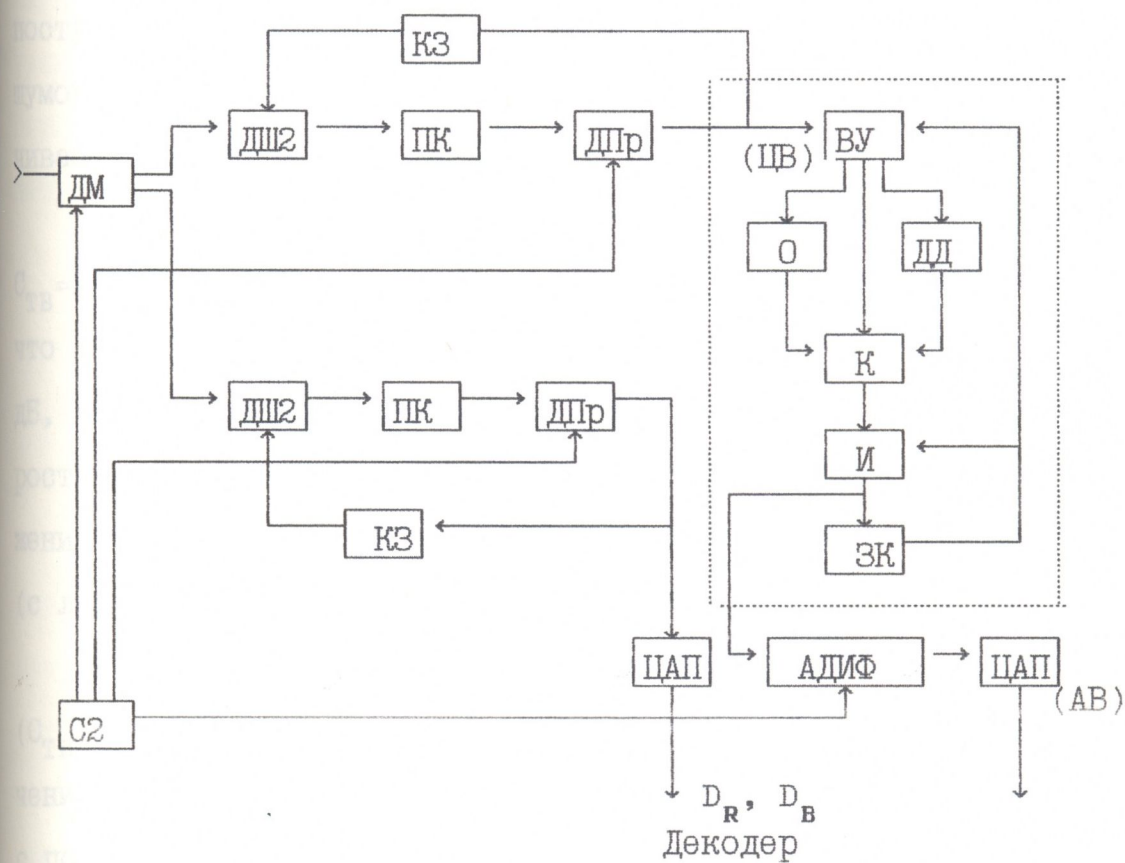


Рис. 4.7.2 Структурная схема декодера АДМКМ
ТВ сигналов

Одновременно (в зависимости от величины межкадровой разности) меняется величина порога, т.е. последний делается адаптивным. При появлении на выходе ДД сигнала о наличии движения в ТВ кадре коммутатор К пропускает разностный сигнал на интегратор И, на второй вход которого одновременно подается сигнал с ЗК. Выходной сигнал с И далее поступает на ЦАП (аналоговый выход АЛ сигнала У). При принятии же решения об отсутствии движения сигнал с ВУ на К поступает через О, в результате чего осуществляется подавление шумов. Как показали измерения, разработанный шумоподавителъ увеличивает отношение $U_{ТВс} / U_{ВЗВ}$ на 5...8 дБ.

Экспериментальные исследования передачи со скоростью $C_{ТВ}=24\text{Мбит/с}$ на макетах аппаратуры цифрового телевидения показали, что при отношении сигнал-шум в канале связи, примерно равном 15 дБ, и применении помехоустойчивых кодеков (с относительной скоростью передачи 7/8) [174] обеспечивается хорошее качество изображения при передаче в стволе ИСЗ с помощью четырехфазного модема (с линейной скоростью $R_{лин} = 58\text{ Мбит/с}$).

В экспериментах при одновременной передаче двух ТВ программ ($C_{ТВ} = 24\text{ Мбит/с}$) использовался модем с $R_{лин} = 48\text{ Мбит/с}$; при значениях вероятности ошибочного приема в канале связи $P_{ош} \approx 10^{-8}$ с помощью измерителя ИСШ-1 было получено $U_{ТВс} / U_{ВЗВ} = 52 \dots 53\text{ дБ}$ (в канале яркости ТВ сигнала); для работы в канале связи с $P_{ош} = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ необходим помехоустойчивый кодек ($R_o = 7/8$), что дает $R_{лин} = 55 \dots 51\text{ Мбит/с}$. Это не представляет каких-либо затруднений при передаче по стандартным спутниковым каналам магистральной связи, в которых на входе модема обеспечивается отношение сигнал-шум 15...16 дБ в полосе 35 МГц.

В связи с тем, что при ДИМ ТВ сигналов возникают различные искажения, среди которых перегрузки по крутизне с ограничением

являются наиболее неприемлемыми, в системе цифровой передачи ТВ сигналов предусмотрена коррекция шумов перегрузки с ограничением на основе метода, в разработке которого принимал участие автор диссертационной работы.

Суть метода, защищенного авторским свидетельством [43], заключается в следующем. На передающей стороне системы перед ДИКМ ТВ сигналов осуществляется обнаружение ожидаемой перегрузки с ограничением. Определяется также величина ожидаемого шума перегрузки с ограничением. При наличии шума перегрузки с ограничением и удовлетворении одного из двух условий

$$x_{\text{пр}} < x_{\text{min}} + y_n \quad \text{или} \quad x_{\text{пр}} > x_{\text{max}} - y_n \quad (4.7.1)$$

(где $x_{\text{пр}}$ - предсказанный сигнал, x_{max} - максимальное значение входного видеосигнала, y_n - максимальный уровень квантования) в канал связи посылаются инвертированные значения разностных сигналов, соответствующих перегрузке. На приемной стороне в блоке обнаружения перегрузки происходит обнаружение разностных сигналов, соответствующих перегрузке. Обнаружение осуществляется по следующему алгоритму. Принимая во внимание, что на приемной стороне системы при наличии перегрузки возникают инвертированные значения разностного сигнала и одновременно учитывая условие (4.7.1), будем иметь (при отсутствии помех в канале связи):

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{пр } j-1} + l_j &> x_{\text{max}} \\ x_{\text{пр } j-1} - l_j &< x_{\text{min}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.7.2)$$

т.е. восстановленный сигнал выходит за пределы динамического диапазона входного видеосигнала.

Следует отметить, что при наличии шумов перегрузки с ограничением одновременно с условиями (4.7.1) на приемной стороне будут выполняться также условия

$$\left. \begin{aligned} l_j &= l_{j+1} = \dots = l_{j+m-1} = y_N, \\ l_j &= l_{j+1} = \dots = l_{j+m-1} = -y_N \end{aligned} \right\}, \quad (4.7.3)$$

где m_{\max} — определяется величиной перегрузки и измеряется в долях числа отсчетов.

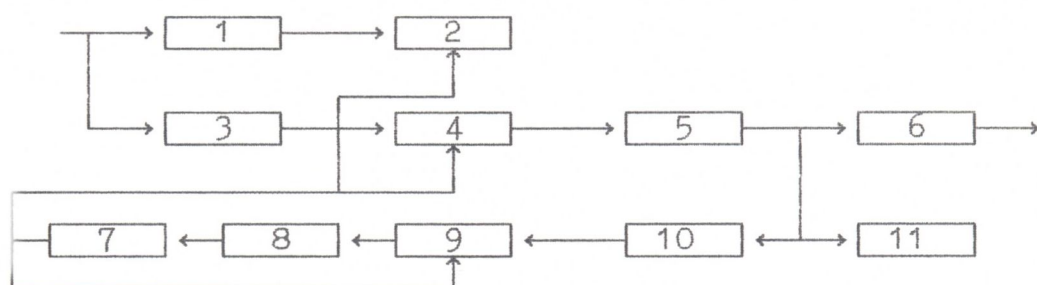
Максимальное значение m_{\max} определяется из условия

$$m_{\max} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{|y_N|} \quad (4.7.4)$$

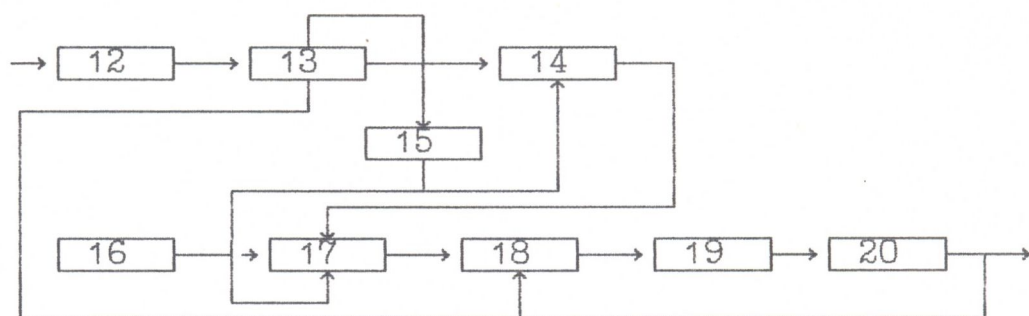
Результат деления в этом случае следует округлить до ближайшего целого числа. Перегрузка после обнаружения устраняется в блоке устранения перегрузки.

Более подробно работу системы ДИКМ ТВ сигналов с коррекцией шумов перегрузки с ограничением рассмотрим с помощью структурных схем передающей и приемной частей, представленных на рис.4.7.3. Структурная схема передающей части (рис.4.7.3а) содержит: блок обнаружения перегрузки 1, блок формирования управляющего сигнала 2, блок задержки, вычитающее устройство 4, квантующее устройство 5, коммутаторов 6, умножитель 7, схему задержки 8, сумматор 9, преобразователь кода 10, инвентор знака 11. Приемная часть (рис.4.7.3б) содержит преобразователь кода 12, блок обнаружения 13, блок сумматоров 14, формирователь управляющего сигнала 15, блок задержки 16, коммутатор 17, сумматор 18, схему задержки 19, умножитель 20.

При наличии высококонтрастных перепадов изображений в блоке 1 происходит обнаружение перегрузки, т.е. формируется сигнал о наличии и величине (в долях числа отсчетов) шума перегрузки, который поступает в блок формирования управляющего сигнала 2. В блок 2 поступает также предсказанный сигнал тракта ДИКМ. Если с блока 1 поступает сигнал о наличии и величине ожидаемого шума перегрузки и в этот момент предсказанный сигнал, поступающий с умножителя 7,



ა)



ბ)

Рис. 4.7.3. Структурные схемы системы ДИКМ ТВ сигналов с коррекцией шумов перегрузки: а- передающая часть; б- приемная часть

удовлетворяет одному из двух условий (4.7.1), то блок формирования управляющего сигнала 1 выдает сигнал управления, соответствующий длительности (в долях числа отсчетов в соответствии с величиной перегрузки), и коммутатор 6 пропускает на выход передающей стороны системы инвертированные значения разностных сигналов, поступающих от инвертора знака 11. Первый из этих разностных сигналов будет соответствовать максимальному уровню квантования y_N с положительным или отрицательным знаком (в зависимости от знака перепеда).).

При отсутствии перегрузки или при наличии перегрузки нераспространяющегося характера блок формирования управляющего сигнала 2 по сигналу блока обнаружения перегрузки 1 пропускает на выход коммутатора 6 кодовые комбинации, поступающие с квантующего устройства 5. Блок задерживает входной сигнал для получения сигнала с ДИКМ после обнаружения в блоке 1 ожидаемой перегрузки. Анализ изложенного показывает, что при наличии шумов перегрузки с ограничением в канал связи передаются такие значения разностных сигналов, алгебраическая сумма которых с предсказанными значениями может выходить за пределы динамического диапазона входного сигнала. Этот факт лежит в основе обнаружения кодовых комбинаций, соответствующих перегрузке на приемной стороне системы. В блоке обнаружения 13 сравниваются поступающие кодовые комбинации разностного и предсказанного сигналов. Если алгебраические суммы этих значений выходят за пределы динамического диапазона входного сигнала, блок 13 выдает сигнал о наличии шума перегрузки. В блоке 13 происходит также обнаружение величины (в долях числа отсчетов) перегрузки путем анализа кодовых комбинаций, соответствующих перегрузке (анализируются числа кодовых комбинаций, соответствующих максимальному уровню квантования). По сигналу из блока 13 в формирователе управ-

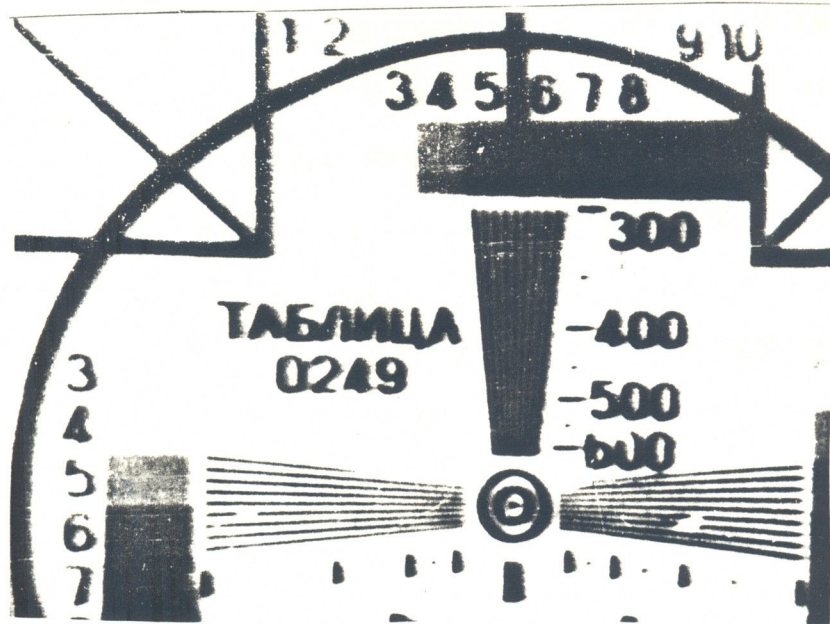
ляющего сигнала 15 формируется сигнал управления о наличии и величине перегрузки. В блоке сумматоров 14 арифметически складываются декодированные значения кодовых комбинаций разностного сигнала, соответствующих перегрузке (число этих значений определяется величиной перегрузки в долях числа отсчетов); затем добавляется сигнал о знаке и по сигналу формирователя управляющего сигнала 15 пропускается на выходе коммутатора 17. Далее приравнивается к нулю определенное число разностных сигналов, число которых определяется соотношением

$$K_H = m_{\text{пер}} - 1, \quad (4.7.5)$$

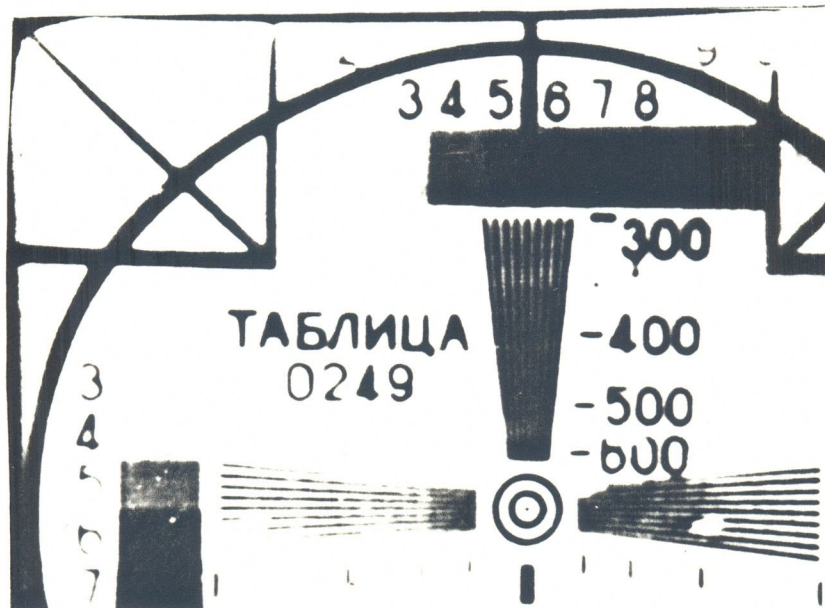
где $m_{\text{пер}}$ — величина перегрузки в долях числа отсчетов, которая определяется согласно выражению (4.7.5). Блок 16 задерживает входной сигнал на величину, необходимую для анализа разностных сигналов, определяющих шумы перегрузки.

На рис.4.7.4а и с коррекцией рис.4.7.4б. Анализ показывает, что предложенный способ коррекции шумов перегрузки с ограничением значительно улучшает качество восстановления резких переходов в изображении.

В связи с тем, что при ДИКМ восстановление сигналов основывается на ранее принятой информации, появление ошибок в кодовых комбинациях разностного сигнала на входе декодера системы приводит к последовательности ошибочных декодирований и размножению ошибок. При этом влияние всякой ошибки распространяется на дальнейшие элементы данной строки изображения по ходу строчной развертки до тех пор, пока не будет произведена коррекция или не произойдет случайная компенсация этого влияния. Следует отметить, что характер размножения ошибки зависит от способа предсказания. При использовании, например, алгоритмов линейного предсказания по предыдущему элементу данной строки эти искажения на восстановленных ТВ изоб-



а)



б)

Рис. 4.7.4 Фрагменты телевизионных изображений на выходы системы ДИСКМ: а - без коррекции шумов перегрузки; б - с коррекцией.

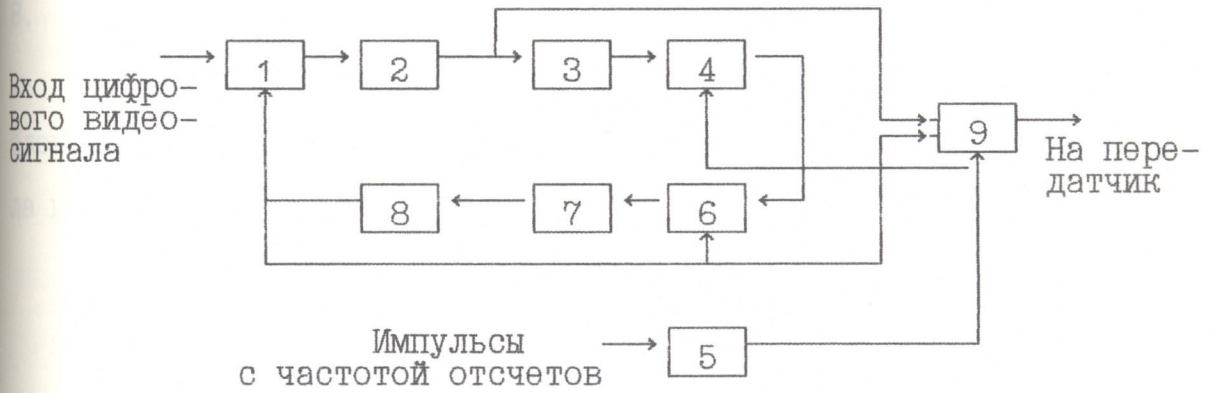
ражениях (даже при малых вероятностях канальной ошибки) проявляется в виде горизонтальных штрихов (треков) различной интенсивности. Как показали исследования [175], заметность шумов ошибочного декодирования проявляется уже при вероятностях ошибки 10^{-7} .

С целью уменьшения ошибок декодирования при одномерной ДИКМ ТВ сигналов нами был предложен метод (защищенный авторским свидетельством [44]), предполагающий коррекцию ошибок, появившихся на входе декодера. Достоинством данного метода перед аналогичными [175] является относительная простота его практической реализации.

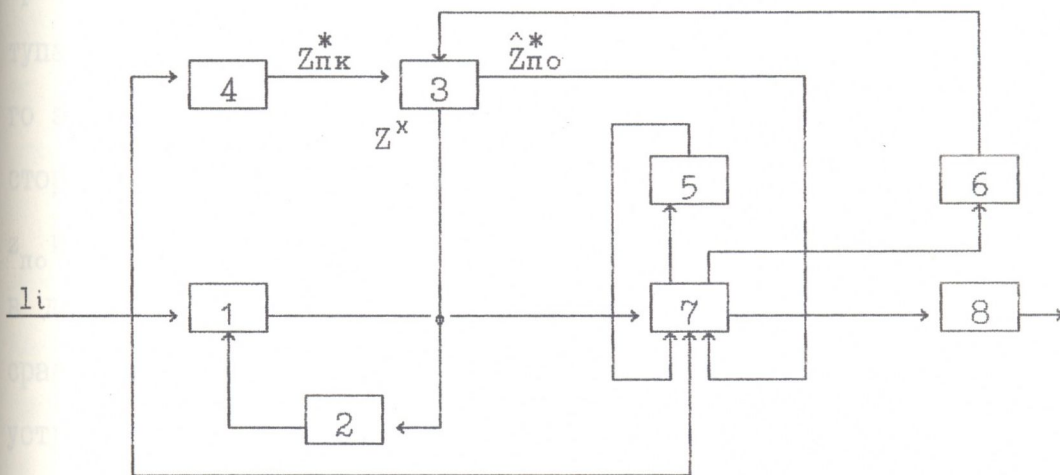
Структурная схема передающей части ДИКМ ТВ сигналов с устройством повышения помехозащищенности [44] представлена на рис.4.7.5а. Она содержит на передающей стороне вычитающее устройство 1, квантующее устройство 2, преобразователь кодов 3, схему запрета 4, формирователь управляющих импульсов 5, сумматор 6, схему задержки 7, умножитель 8, коммутатор каналов 9.

Алгоритм работы системы ДИКМ с устройством обнаружения, локализации и коррекции ошибок декодирования заключается в следующем. На передающей стороне системы исключаются последние элементы группы (так же, как в методе, предложенном в [175]), на которые разбиваются строки изображения (экспериментально установлено [175], что число элементов в группе можно выбрать равным 75). Вместо них передается дополнительная (контрольная) информация в виде четырехразрядного слова (с помощью коммутатора 9) из старших разрядов, восстановленного в петле обратной связи значения яркости предыдущего ему элемента. Расположение контрольных отсчетов, а следовательно, и группы меняется от строки к строке и от кадра к кадру.

Структурная схема приемной части системы связи ДИКМ ТВ сигналов с устройством обнаружения, локализации и коррекции ошибок представлена на рис.4.7.5б, она содержит: первый сумматор 1, блок



а)



б)

Рис.4.7.5 Структурные схемы системы ДИКМ ТВ сигналов с повышенной помехоустойчивостью: а) - передающая часть; б) - приемная часть.

задержки 2, первое сравнивающее устройство 3, выделитель контрольной информации 4, второе сравнивающее устройство 5, второй сумматор 6, запоминающее устройство 7, цифроаналоговый преобразователь 8.

Рассмотрим вкратце работу приемного устройства. Сумматор 1 и блок задержки 2 восстанавливают значения отсчетов исходного сигнала по алгоритму

$$z_j^* = az_{j-1}^* + 1_j \quad (4.7.6)$$

Затем четыре старших разряда последнего (74-го) восстановленного отсчета $z_{по}^*$ данного блока подаются на вход сравнивающего устройства 3, куда также с выделителя контрольной информации 4 поступает четырехразрядное слово $z_{пх}^*$ из старших разрядов того же 74-го элемента, восстановленного в петле обратной связи на передающей стороне. В первом сравнивающем устройстве 3 происходит сравнение $z_{по}^*$ и $z_{пх}^*$ и при $|z_{по}^* - z_{пх}^*| > 0$ принимается решение о наличии ошибки в данном блоке. Во втором сравнивающем устройстве 5 происходит сравнение всех восстановленных отсчетов, хранящихся в запоминающем устройстве 7 данного блока и блока предыдущей строки, расположенного непосредственно над анализируемым.

За ошибочно восстановленный принимается тот расположенный на j -й позиции отсчет, для которого разность

$$d_j = |(z_j^* - z_{j-1}^*) - (z_{j-1}^* - z_{j-1}^*)|$$

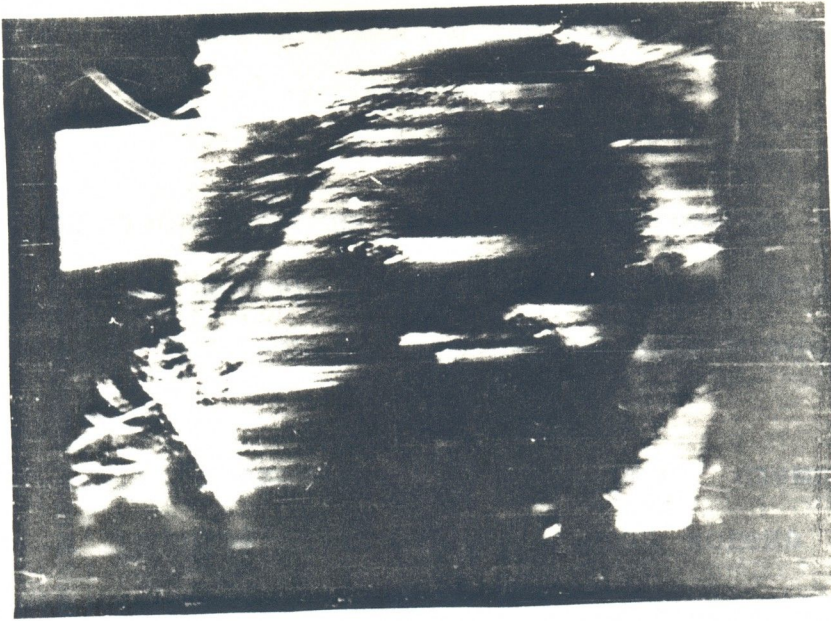
максимальная; здесь z_j^* , z_{j-1}^* - элементы анализируемого блока; z_j^* , z_{j-1}^* - элементы блока предыдущей строки.

Локализованный таким образом ошибочно восстановленный отсчет корректируется следующим образом. В кодовой комбинации разностного сигнала, значения которого хранятся в запоминающем устройстве 7 соответствующего j -му отсчету данного блока, производится инвер-

тирование одного из символов. Далее, начиная с j -го отсчета, во втором блоке сравнения 5 заново вычисляются все $j + 1, j + 2, \dots, n$ отсчетов и четыре старших разряда последнего скорректированного отсчета $\hat{Z}_{пк}^*$ данного блока снова сравниваются с $\hat{Z}_{по}^*$. Если $|Z_{по}^* - \hat{Z}_{пк}^*|$, то ошибка считается скорректированной и весь блок отсчетов подается на цифроаналоговый преобразователь 8 системы ДИКМ. В противном случае в разностном сигнале, соответствующем j -му отсчету, инвертируется следующий символ и описанная процедура повторяется до выполнения условия коррекции.

С целью проверки работоспособности устройства коррекции ошибок был проведен эксперимент. На рис.4.7.6а, представлено восстановленное методом ДИКМ ТВ изображение, прошедшее через канал с вероятностью ошибки 10^{-3} . На рис.4.7.6б показано то же изображение при восстановлении методом ДИКМ с устройством коррекции ошибок.

Анализ этих изображений показывает, что качество восстановленного ТВ изображения (рис.4.7.6б) с устройством обнаружения, локализации и коррекции ошибок значительно превосходит ТВ изображение (рис.4.7.6а), восстановленное без коррекции ошибок.



а)



б)

Рис.4.7.6 Фрагменты телевизионных изображений на выходе системы ДЛМ при вероятности ошибки в канале связи $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$: а - без коррекции ошибок ; б - при коррекции

4.8. Кодек ТВ сигналов для систем видеоконференцсвязи со скоростью 256 Кбит/с

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в данной диссертационной работе были использованы при построении кодека ТВ сигналов для систем видеоконференцсвязи на скорость 256 Кбит/с.

На рис.4.8.1 представлена структурная схема передающей (рис.4.8.1а) и приемной (рис.4.8.1б) сторон кодека ТВ сигналов. Следует отметить, что при использовании данного кодека, передача сигналов звукового сопровождения и дополнительной информации осуществляется в общем потоке 256 Кбит/с. Рассмотрим в кратце работу кодека.

Сигналы первичных цветов E'_R , E'_C и E'_B подаются на входы кодирующей матрицы КМ. На выходе КМ образуются яркостный E_Y и два цветоразностные сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} . Яркостный сигнал после низкочастотной фильтрации в фильтре нижних частот ФНЧ поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП1, где частота дискретизации равна 13,5 МГц, а число уровней квантования - 256. С выхода АЦП1 цифровые сигналы поступают на вход дополнительного дискретизатора ДД1, где осуществляется субдискретизация с частотой 4,5 МГц. Одновременно осуществляется частотное перемежение и создается шахматная структура расположения отсчетов в поле. С выхода ДД1, цифровой яркостный сигнал подается на вход кодера яркостного сигнала КЯС. В КЯС используется разработанный в дополнительной работе двухкаскадный векторный квантователь. При этом квантованию подвергается каждое пятое поле. Параметры блоков, а также число кодовых векторов в кодовой книге выбраны так, что число дв.ед на элемент изображения равно 0,25. Таким образом, на выходе КЯС образуется

цифровой поток со скоростью 225 Кбит/с.

Цветоразностные сигналы, в свою очередь, разделяются коммутатором К и после низкочастотной фильтрации в фильтре нижних частот ФНЧ поступают на вход другого аналого-цифрового преобразователя АЦП2, где частота дискретизации равна 6,75 МГц, а число уровней квантования - 256. С выхода АЦП2 цифровой поток цветоразностных сигналов поступает на вход другого дополнительного дискретизатора ДД", где осуществляется субдискретизация с частотой 0,9 МГц. Здесь также, как и в случае яркостного сигнала осуществляется частотное перемежение и создается шахматная структура в поле. С выхода ДД2 информация поступает на вход кодера цветоразностных сигналов КЦС. КЦС работает аналогично КЯС, отличаются лишь кодовые книги. Следовательно, на выходе КЦС образуется цифровой поток со скоростью 45 Кбит/с. С помощью преобразователя скоростей ПС, эта информация переносится в строчный гасящий интервал со скоростью 225 Кбит/с.

В устройстве объединения УО объединяются цифровые потоки, соответствующие яркостному и цветоразностным сигналам, цифровой сигнал звукового сопровождения ЗС, дополнительная цифровая информация ДИ и сигналы синхронизации СС. При этом сигналы звукового сопровождения передаются во время кадрового гасящего интервала.

Таким образом, на выходе УО образуется цифровой поток со скоростью 256 Кбит/с.

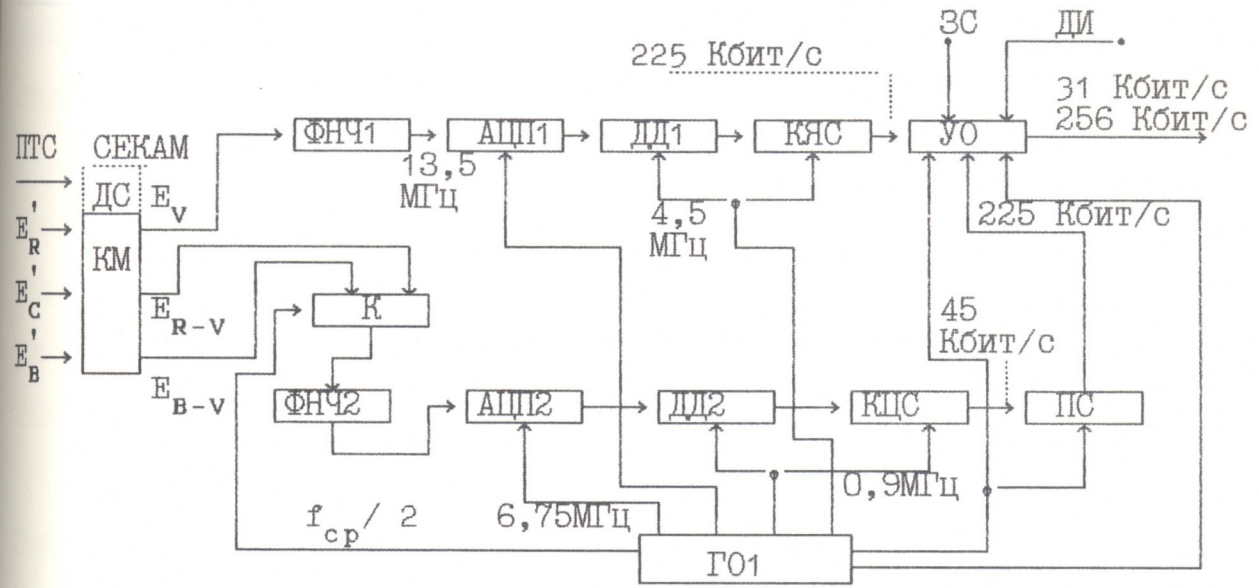
На приемной стороне кодека, на выходе устройства разделения УР получают цифровые потоки: яркостного и цветоразностных сигналов, звукового сопровождения и дополнительной информации. С помощью устройства выделения УВ от цифрового сигнала, поступающего с выхода приемного устройства выделяются сигналы синхронизации СС, которые поступают на вход генераторного оборудования Г02. На выхо-

дах декодеров яркостного (ДЯС) и цветоразностных сигналов (ДЦС) образуются соответственно яркостный и цветоразностные сигналы, которые поступают в интерполяторы ИНТ1 ... ИНТ4.

Интерполяторы ИНТ1 и ИНТ3 предназначены для интерполяции пропущенных (из-за частотного перемежения) элементов, а интерполяторы ИНТ2 и ИНТ4 - для интерполяции пропущенных полей. На выходах ЦАП1 и ЦАП2 получаются соответственно яркостный и цветоразностные сигналы. Кодер СЕКАМ КС дает возможность получения полного ТВ сигнала в стандарте СЕКАМ.

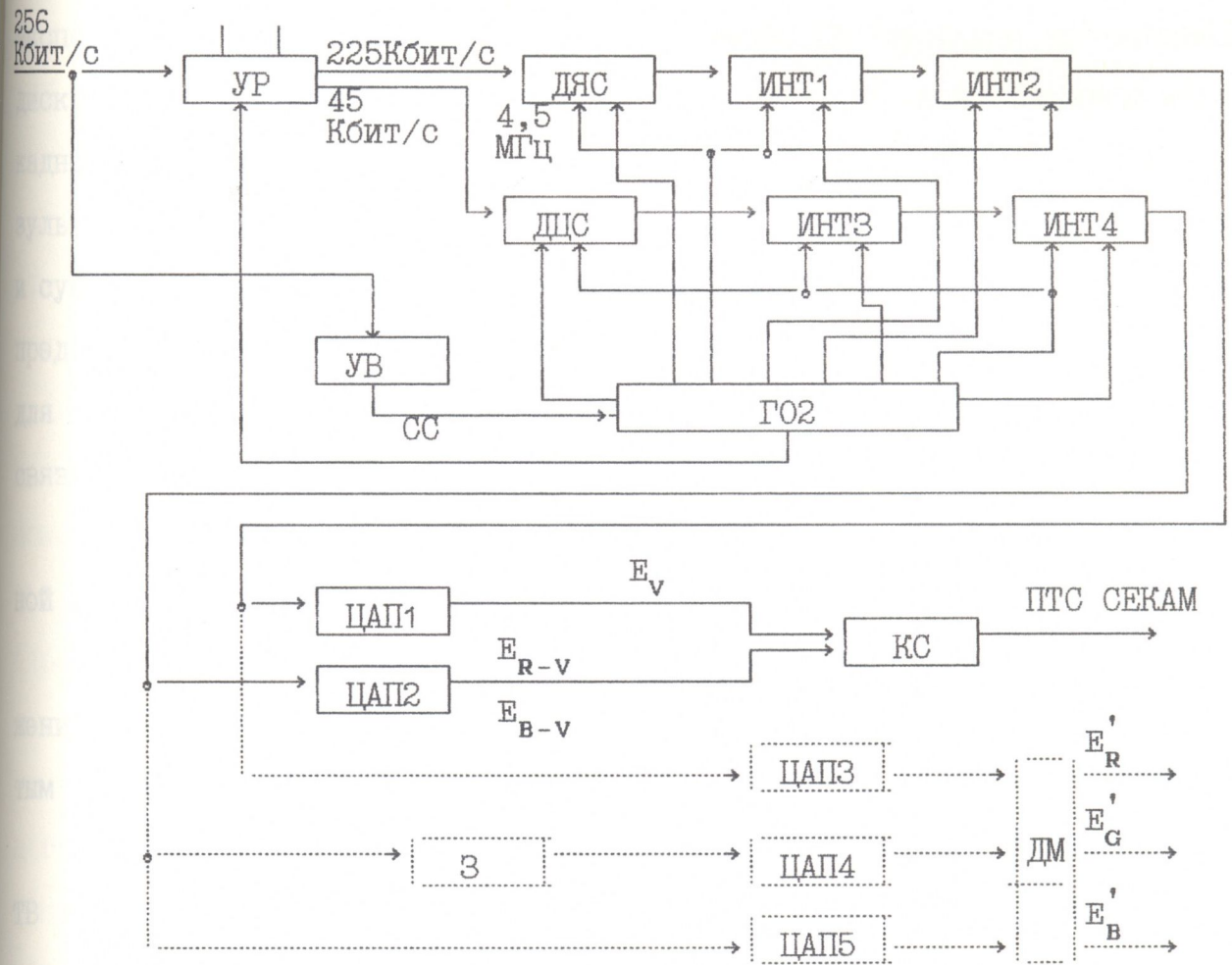
В заключение отметим, что вышепредложенный кодек, после несущественной доработки, дает возможность:

- обработать как сигналы первичных цветов (E'_R, E'_G, E'_B), так и либо полный ТВ сигнал СЕКАМ, либо яркостный и цветоразностные сигналы (следовательно, в этих случаях КМ не нужен, и необходим декодер СЕКАМ, что показана на рис.4.8.1а пунктиром);
- обработать цифровые сигналы, поступающие с цифровых ТВ студий (в этом случае КМ, ФНЧ1, ФНЧ2, АЦП2 не нужны);
- получить на выходе кодека как ПТС СЕКАМ, так и сигналы первичных цветов (в этом случае в декодере добавляются цифровая задержка на строку 3, декодирующая матрица ДМ и ЦАП-и, что показана на рис.4.8.1б пунктиром).



а) Передающая сторона кодека

Рис.4.8.1 Структурная схема кодека ТВ сигналов



б) Приемная сторона кодека

Рис.4.8.1 Структурная схема кодека ТВ сигналов

Выводы к главе 4

Глава 4 содержит результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований квантования ТВ сигналов на основе: дискретного косинус преобразования, решетчатого квантования и каскадного векторного квантования. В главе также представлены результаты исследований качественных и информационных характеристик и субъективно-статистических экспертиз ВК ТВ изображений. Здесь же представлены результаты экспериментальных исследований квантований для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи и для систем видеоконференцсвязи.

Новыми результатами обладающими авторским приоритетом в данной главе являются:

1. Результаты исследований векторного квантования ТВ изображений в сочетании с дискретным косинус преобразованием и решетчатым квантованием.

2. Результаты исследования каскадного векторного квантования ТВ изображений при использовании блоков различной размерности в первом и во втором каскадах двухкаскадного ВК.

3. Результаты исследований качественных и информационных характеристик квантованных ТВ изображений с целью оценки потенциальной эффективности скалярного и векторного квантований ТВ изображений.

4. Результаты субъективно-статистических экспертиз для различных методов векторного квантования ТВ изображений.

5. Результаты экспериментальных исследований скалярного и векторного квантования для систем цифровой передачи по спутниковым линиям связи и для систем видеоконференцсвязи ТВ сигналов.

Это дало возможность:

1. Построить адаптивный классифицированный векторный квантователь в сочетании с дискретным косинус-преобразованием ТВ изображений и экспериментально исследовать его качественные характеристики, как по сравнению с пространственным ВК, так и в сочетании ДКП с решетчатым квантованием: а) установить, что пиковое отношение сигнал-шум, при скорости кодирования $R = 0,25$ бит/эл, составляет 29,7 дБ, что на 5дБ выше, чем ВК в пространственной области; б) установить, что использование решетчатого квантования, Z^{16} , для квантования коэффициентов ДКП позволяет на порядок повысить быстродействие алгоритма квантования по сравнению с обычным алгоритмом ВК; в) установить, что время создания кодовой книги, при использовании решетчатого квантования, сокращается в среднем на 30-35% по сравнению с тем случаем, когда начальная кодовая книга выбирается случайным образом.

2. Установить, что когда размерность вектора во втором каскаде, двухкаскадного ВК, четыре раза превосходит размерность вектора в первом каскаде качество восстановленного ТВ изображения лучше, чем при использовании одинаковой размерности кодовых векторов, в обоих каскадах двух каскадного ВК. Экспериментально установлено, что когда объемы кодовых книг и размерности векторов, в первом и во втором каскадах, равны соответственно: $N_1 = 256$, $K_1 = 4 \times 4$ и $N_2 = 64$, $K_2 = 8 \times 8$, при скорости кодирования $R = 0,593$ бит/эл., пиковое отношение сигнал-шум составляет 35,2 дБ.

3. Получить выражение для оценки отношения сигнал-шум квантования с учетом пик-фактора ТВ изображений, дающее возможность установить, что теоретическая оценки ОСШ квантования на 12дБ ниже, чем оценки полученные на основе предложенного выражения. Установить, что реальное ОСШ векторного квантования ТВ изображений (при скорости кодирования 1 бит/эл.), по крайней мере на 12 дБ больше,

чем при скалярном квантовании, в то время когда соответствующая теоретическая оценка составляет 7,3 дБ;

установить, что при векторном квантовании ТВ изображений наибольшему изменению подвергаются совместная и условная энтропии изображения. Так, для нормированного ВК, относительное изменение безусловной энтропии составляет 0,26%, для совместной энтропии - 1,92% а для условной энтропии 4,42%. В то время как для обычного алгоритма ВК, значения этих энтропий составляют 5,4%, 20% и 41,6%, соответственно. Показать, что в зависимости от использовании энтропии разного порядка, при кодировании ТВ изображений, можно достигнуть различного коэффициента сжатия. Так, установлено, что при двухкаскадном ВК использование безусловной энтропии позволяет достигнуть коэффициента сжатия, $K_1 = 18,28\%$ а при использовании условной энтропии - $K_{12} = 33,59\%$;

установить, что для измерения "близости" между исходным и квантованными изображениями целесообразно использовать коэффициент, Γ_{yx} показывающий степень влияния исходного изображения на квантованное изображение;.

показать, что векторное квантование ТВ изображений требует на 0,44 бит/эл. больше чем ВК с энтропийным кодированием векторов, что при пересчете на элемент изображения составляет 0,0275 бит.

4. Показать, что на основе субъективно-статистических экспертиз качество квантованных ТВ изображений составляет для: обычного алгоритма ВК - (- 2,3 балла), интерполяционного ВК (- 1,2 балла) классифицированного ВК - (- 0,75 балла), ВК с Вейвлет преобразованием (- 0,3 балла), ВК с дискретным косинус преобразованием (- 0,2 балла) - двухкаскадное ВК - (-0,1)балла) трехмерное ВК для последовательности ТВ изображений (- 0,5 балла) двумерное ВК для последовательности ТВ изображений (- 2,5 балла) и нормированное

ВК - (- 0,35 балла). Установлено, так же, что субъективная оценка ТВ изображений, восстановленных с помощью трехмерного ВК составляет 4 - 4,5 балла, а для двухкаскадного ВК - 4,9 балла, по пяти-балльной шкале ухудшения МККР.

5. Установить, что скалярные квантователи, разработанные на основе результатов исследований, проведенных в данной диссертационной работе, позволяют разработать кодек на скорость 24 Мбит/с, для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи, обеспечивающий возможность передачи двух ТВ программ в одном стволе ИСЗ с требуемым качеством изображений.

Экспериментально показать, что предложенное в данной диссертационной работе устройство обнаружения локализаций и коррекции ошибок декодирования, для системы ДИКМ, обеспечивает хорошую коррекцию ошибок для канала с вероятностью ошибки 10^{-3} .

Установить, что использование полученных в данной диссертационной работе результатов исследований по векторному квантованию дает возможность построить кодек для цифровых систем видеоконференцсвязи со скоростью 256 кбит/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Показано, что векторное квантование является методом блочно-го кодирования источника сигнала и при достаточно большой размерности, существует векторный квантователь с погрешностью сколь угодно близкой к нижней границе погрешности и скоростью произвольно близкой к функции скорость-погрешность. Установлено, что предложенный модифицированный алгоритм создания кодовой книги, на основе уменьшения вероятности появления пустых кластеров, позволяет повысить эффективность процесса создания кодовых книг.

Установлено, что для выбора начальной кодовой книги целесообразно использовать модифицированный метод "ближайшего соседа", позволяющий сократить вычислительные затраты при создании кодовой книги на 40-50% по сравнению с тем случаем, когда начальная кодовая книга выбирается случайным образом.

Показано, что когда число обучающих векторов, приходящих на один кодовый вектор больше, чем число блоков, приходящих на число обучающих векторов, среднеквадратическая ошибка уменьшается на 18%.

Показано, что использование психовизуальных свойств зрения позволяет уменьшить вычислительные затраты, как при создании кодовой книги, так и при квантовании ТВ изображения в 10-12 раз по сравнению с алгоритмом полного перебора. Модифицированный метод, с использованием вероятностных характеристик и свойств векторного пространства кодовых векторов, позволяет снизить время обработки в 5-7 раз, по сравнению с алгоритмом полного перебора и увеличить отношение сигнал-шум на 5...6 дБ, по сравнению с известным быстрым алгоритмом ВК.

2. Оценены выигрыши в отношении сигнал-шум квантования при переходе от равномерного квантования к неравномерному на основе предложенных законов компандирования, составляющие 3...6 дБ для исходных ТВ сигналов и 12 дБ для их разностных значений.

Оценен теоретически выигрыш в двоичных единицах при переходе от равномерного скалярного квантования к равномерному векторному квантованию на основе сравнения верхней границы энтропии разности с k -мерным объемом ячейки разделения векторного пространства составляющий 0,255 бит/отсчет.

Показано что, сложные итерационные методы расчета параметров квантования ТВ сигналов, выполняемые с помощью ЭВМ, к относительно простым аналитическим и графическим расчетам, позволяющим сократить время вычислений в 10-15 раз.

3. Установлено, что при распределении вероятностей, принадлежащих классу ограниченных на интервале распределений, робастным является равномерное квантование.

Определено, что наибольшая робастность (характеризуемая нечувствительностью отношения сигнал-шум квантования к многомерному увеличению дисперсии квантуемых сигналов) квантование достигается при распределении вероятности значений квантуемых ТВ сигналов, описываемых функцией Гаусса, и параметрах квантования, согласованных с распределением Лапласа. В том случае, когда квантование согласовано по распределению, но не согласованно по дисперсии, например при числе уровней квантования 32, увеличение дисперсии квантуемых сигналов в четыре раза вызывает уменьшение отношения сигнал-шум на 12 дБ.

4. Установлено, что предложенная методика определения параметров квантования ТВ сигналов с учетом зрительных порогов заметности специфических искажений, позволяет значительно

упростить процедуру определения параметров квантования на основе предложенных аналитических выражений и рекуррентных соотношений, обеспечивающих более высокую точность по сравнению с существующими графическими методами.

Установлено, что присоединении, векторного квантования со скалярным квантованием (на основе отдельного квантования среднего и среднеквадратического значений векторов) не нарушает оптимальности ВК; а) экспериментально установлено, что среднее значение вектора следует квантовать равномерной шкалой на 32 уровня, а среднеквадратические значения вектора (с учетом закона распределения вероятностей), неравномерной шкалой на 16 уровней, построенной для распределения Лапласа; б) установлено что сочетание скалярного квантования с ВК обеспечивает робастность процесса векторного квантования ТВ изображений.

5. Установлено, что переход, при ВК ТВ изображений, от ортогональной структуры дискретизации к шахматной, приводит к снижению точностных показателей процесса ВК в среднем на 2 дБ, в то же время число бит на элемент при переходе к шахматной структуре уменьшается вдвое. Кроме того, точностные показатели ВК при формировании кодовой книги на основе критерия минимума среднеквадратической ошибки выше, чем при использовании критерия минимакса.

Показано, что переход при формировании начальной кодовой книги от блоков квадратной формы к прямоугольной с большим горизонтальным или вертикальным размером, приводит к уменьшению точностных показателей в среднем на 1 дБ, а при использовании блоков, имеющих форму параллелограмма, точностные показатели ухудшаются в среднем на 2 дБ.

Показано, что переход к блокам ромбовидной формы при формировании начальной кодовой книги обеспечивает улучшение точностных

показателей ВК по сравнению со всеми другими формами блоков. Так, например, по сравнению с прямоугольной формой блоков выигрыш в отношении сигнал-шум квантования составляет в среднем 0,45 дБ, а по сравнению с блоками, имеющими форму параллелограмма - 1,5 дБ.

6. Показано, что восстановление ТВ изображений подвергнутых ВК, применением блоков с перекрывающимися столбцами и строками, сформированными путем интерполяции на основе элементов принадлежащих соседним блокам, позволяет увеличить, например, пиковое отношение сигнал-шум в среднем на 1,5 дБ.

Установлено, что интерполяционное ВК дает возможность существенного уменьшения специфических искажений ВК ТВ изображений. Так, например, пиковое отношение сигнал-шум увеличивается в среднем на 1,2 дБ, по сравнению методами "перекрытия блоков".

7. Установлено, что векторное квантование ТВ изображений с переменной точностью квантования, при котором учитывается как зависимость остроты зрения от угла периферийности, так и анизотропия пространственного спектра реальных ТВ изображений и свойство их зрительного восприятия, позволяет улучшить субъективное качество восстановленных ТВ изображений на 0,5 балла по шкале сравнения.

Установлено, что переход от обычного ВК к классифицированному ВК, на основе контуро-текстурной модели ТВ изображений, позволяет повысить качество восстановленных контуров ТВ изображения. Предложенная методика модифицированного КВК позволило уменьшить среднюю мощность ошибок в контурной части изображения на 20,4% по сравнению с обычным КВК, и на 31,1% по сравнению с обычным алгоритмом ВК.

8. Показано, что переход от двумерного блока к трехмерному дает возможность значительно уменьшить специфические искажения типа "муар", что типично для ВК последовательности ТВ изображений на

основе двумерного ВК. Кроме того, трехмерное ВК позволяет значительно снизить число дв.ед. на элемент изображения, сохраняя приемлемое качество восстановленной последовательности ТВ изображений при 0,07 бит/эл. и пиковом отношении сигнал-шум в среднем 27 дБ.

Экспериментально установлено повышение эффективности кодирования ТВ изображений на основе сочетания пирамидального построения Веивлет с векторным квантованием областей пирамиды, содержащих высокочастотные составляющие сигнала. При этом коэффициент сжатия 10, а пиковом отношении сигнал-шум 29,75 дБ. Показано, что если из процесса восстановления исключить область первого уровня пирамиды, с высокочастотными составляющими сигнала в обоих направлениях, то коэффициент сжатия может быть увеличен на 1,7 при снижении пикового отношения сигнал-шум на 0,5 дБ.

Экспериментально показано, что адаптивный классифицированный векторный квантователь в сочетании с дискретным косинус преобразованием ТВ изображений обеспечивает улучшение качественных показателей ВК. Установлено, что: а) пиковое отношение сигнал-шум, при скорости кодирования 0,25 бит/эл. составляет 29,7 дБ, что на 5 дБ выше, чем при ВК в пространственной области; б) использование решетчатого квантователя, для дискретного косинус-преобразования позволяет на порядок повысить быстродействие алгоритма квантования по сравнению с обычным алгоритмом ВК; в) время создания кодовой книги, при использовании решетчатого квантования, сокращается в среднем на 30-35%, по сравнению с тем случаем, когда начальная кодовая книга выбирается случайным образом.

Показано, что когда размерность вектора во втором каскаде, двухкаскадного ВК, в четыре раза превосходит размерность вектора в первом каскаде качество восстановленного ТВ изображения лучше, чем при использовании одинаковой размерности кодовых векторов в

обоих каскадах двух каскадного ВК. Экспериментально установлено, что когда объемы кодовых книг и размерности векторов в первом и во втором каскадах равны, соответственно: 256, 4x4 и 64, 8x8, при скорости кодирования 0,593 бит/эл., пиковое отношение сигнал-шум составляет 35,2 дБ.

Предложено выражение для оценки отношения сигнал-шум квантования с учетом пик-фактора ТВ изображений, дающее возможность установить, что теоретическая оценки отношение сигнал-шум квантования на 12 дБ ниже, чем оценки полученные на основе предложенного выражения. Установлено, что реальное отношение сигнал-шум векторного квантования ТВ изображений (при скорости кодирования 1 бит/эл.), по крайней мере на 12 дБ больше, чем при скалярном квантовании, в то время когда соответствующая теоретическая оценка составляет 7,3 дБ.

Показано, что при векторном квантовании ТВ изображений наибольшему изменению подвергаются совместная и условная энтропии. Так, для нормированного ВК, относительное изменение безусловной энтропии составляет 0,26%, совместной энтропии - 1,92%, а условной энтропии 4,42%. В то время, как для обычного алгоритма ВК, значения этих энтропии составляют 5,4%, 20% и 41,6%, соответственно. Установлено, что в зависимости от использовании энтропии разного порядка, при кодировании ТВ изображений, можно достигнуть различного коэффициента сжатия. Так установлено, что при двухкаскадном ВК использование безусловной энтропии позволяет достигнуть коэффициента сжатия 18,28%, а при использовании условной энтропии - 33,59%.

Показано, что для измерения "близости" между исходным и квантованными изображениями целесообразно использовать коэффициент, показывающий степень влияния исходного ТВ изображения на кванто-

ванное.

Экспериментально установлено, что векторное квантование ТВ изображений требует на 0,44 бит/эл. больше, чем ВК с энтропийным кодированием, что при пересчете на элемент ТВ изображения составляет 0,0275 бит.

Показано, что на основе субъективно-статистических экспертиз качество квантованных ТВ изображений составляет для: обычного алгоритма ВК 2,7 балла, интерполяционного ВК 3,8 балла классифицированного ВК 4,2 балла, ВК с Вейвлет преобразованием 4,7 балла, ВК с дискретным косинус-преобразованием 4,8 балла, двухкаскадного ВК 4,9 балла, трехмерного ВК для последовательности ТВ изображений 4,5 балла, двухмерного ВК для последовательности ТВ изображений 2,5 балла и при сочитании скалярного и векторного квантований 4,6 балла. Установлено, так же, что субъективная оценка ТВ изображений, восстановленных с помощью трехмерного ВК составляет 4 - 4,5 балла, а для двухкаскадного ВК - 4,9 балла, по пятибальной шкале ухудшения МККР.

Установлено, что скалярные квантователи, разработанные на основе результатов исследований, проведенных в данной диссертационной работе, позволяют разработать кодек на скорость 24 Мбит/с, для систем цифровой передачи ТВ сигналов по спутниковым линиям связи, обеспечивающий возможность передачи двух ТВ программ в одном стволе ИСЗ с требуемым качеством изображений.

Установлено, что использование полученных в данной диссертационной работе результатов исследований по векторному квантованию дает возможность построить кодек для цифровых систем видеоконференцсвязи со скоростью 256 кбит/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Харатишвили Н.Г., Зумбуридзе О.Г., Епанечников В.Д., Кумыш Е.И. Спутниковое телевидение. Новые методы передачи. - М.: Радио и связь, 1993. - 268 с.
2. Зумбуридзе О.Г., Мгалоблишвили К.Д., Гогоберидзе Л.И. Векторное квантование ТВ сигналов.// - Труды ГИИ, - №10, - 1989, -с.18-23
3. Zumburidze O.G., Kharatishvili N.G., Ding Chengjun, Gurgenidze Z.A. Vector quantization for video-conferencing.// Bulgarian Signal Processing International Conference, 1990, pp.10-11.
4. Ding Chengjun, Zumburidze O.G. Fast algorithms in TV image vector quantization.//International Conference on Communication Technology, Beijing, China, - Sep. 1992, pp.23.04.1-23.04.3.
5. Харатишвили Н.Г., Зумбуридзе О.Г., Дин Ченьцзюнь, Гургенидзе З.А. Экспериментальные исследования некоторых методов векторного квантования ТВ изображений.//Труды НИИР, - №4, -1991, -с. 29-31
6. Зумбуридзе О.Г., Харатишвили Н.Г. Уменьшение видности шумов квантования в цифровых телевизионных системах // Вопросы цифрового кодирования телевизионных сигналов : Тр. ГПИ им. В.И.Ленина. 1974. - № 8 (172). - с. 10-30
7. Харатишвили Н.Г., Папунашвили В.Д., Мурджикнели Г.Г., Хоштария К.А., Зумбуридзе Л.И., Кешелава И.Н., Томарадзе О.К. Некоторые вопросы построения систем цифрового кодирования телевизионных сигналов // Аннот. докл. ХУП науч.-техн. конф. проф.-препод. состава втузов Закавказских республик. - Баку, 1973.-с.53-54
8. Зумбуридзе О.Г. Квантование телевизионных сигналов с учетом свойств источника и получателя // Тез. докл. XIX Республ. науч.-техн. конф. проф.-препод. состава ГПИ им. В.И. Ленина и работников производства. Тбилиси, 1975. -с. 187-188

9. Зумбуридзе О.Г., Харатишвили Н.Г. Некоторые вопросы уменьшения видности шумов квантования в ТВ системах // Тез. докл. ХУШ Республ. науч.-техн. конф. проф.-препод. состава ГПИ им. В.И. Ленина и работников производства. - Тбилиси, 1974. - с. 46-47
10. Харатишвили Н.Г., Папунашвили В.Д., Мурджикнели Г.Г., Хоштария К.А., Зумбуридзе О.Г., Хунцария Д.М., Буркадзе А.М., Гогоберидзе Л.И., Томарадзе О.К., Тваури Т.В., Мазиашвили Т.И. Видео-телефонная система "ГПИ-50" // Приборостроение : Тр. ГПИ им. В.И. Ленина. - 1974. - №9(173). - с.19-21
11. Zumburidze O.G., Kharatishvili N.G., Gurgenidze Z.A. Image vector quantization. // - Latvia Signal Processing International Conference, Riga, Latvia, Apr. 1990, pp.66-70.
12. Зумбуридзе О.Г. Информационные оценки процесса нелинейного преобразования ТВ сигналов // Тез. докл. XIX Республ. науч.-техн. конф. проф.-препод. состава ГПИ им. В.И. Ленина и работников производства. - Тбилиси, 1975. - с. 86-87
13. Харатишвили Н.Г., Папунашвили В.Д., Мурджикнели Г.Г., Зумбуридзе О.Г., Хоштария К.А., Гогоберидзе Л.И., Робиташвили А.Г. Разработка системы двоичного кодирования телевизионных сигналов со скоростью 1...1,2 млн.преоб/с. Отчет по НИР. Гос. регистр. № 72.028831. - Тбилиси, ГПИ им В.И. Ленина. - 1972. - 51 с.
14. Зумбуридзе О.Г. Исследование и разработка методов и устройств оптимизированного квантования телевизионных сигналов. Автореферат кандидатской диссертации - М.: 1987. 20 с.
15. Зумбуридзе О.Г. Исследование методов повышения эффективности процесса квантования. Отчет гос. бюджетной работы. Гос. регистр. № 79039713. - Тбилиси. - 1981. - 85 с.
16. Гогоберидзе Л.И., Зумбуридзе О.Г. К вопросу цифрового пред-

ставления непрерывных сигналов // Электросвязь : Тр. ГПИ им. В.И. Ленина. - 1976. - № 7 (189). - с. 38-41

17. Зумбуридзе О.Г., Гогоберидзе Л.И. Об оценке эффективности цифрового кодирования при заданных статистических характеристиках кодируемых сигналов // Тез. докл XX науч.-техн. конф. проф.-препод. состава ГПИ им. В.И. Ленина и работников производства. - Тбилиси, 1976. - с. 19-20
18. Зумбуридзе О.Г., Гогоберидзе Л.И. О квантовании телевизионных сигналов // Тр. НИИР. - 1986. - № 3. - с. 84-88
19. Зумбуридзе О.Г. Оптимальное квантование телевизионных сигналов при ДИКМ // Тр. НИИР. - 1984. № 2. - с. 116-122
20. Зумбуридзе О.Г. Оптимальное квантование сигналов изображений с учетом функций видности и маскирования // Тр. ГПИ им. В.И. Ленина. - 1976. - № 7 (189). - с. 38-41
21. Zumburidze O.G. Cuantizarea optima a semnalelor de imagine // Simpozion nasional de electronica aplicata. - Bucuresti, 1981. - pp. 12-13.
22. Зумбуридзе О.Г. Эффективное квантование ТВ сигналов при ДИКМ // Тез. докл. XXII науч.-техн. конф. проф.-препод. состава вузов Закавказья. - Тбилиси, 1984. - с. 32-33
23. Зумбуридзе О.Г. К вопросу оптимального квантования сигналов изображений с учетом свойств зрения для ДИКМ // Сокращение избыточности в цифровых телевизионных системах : Программа и тез. докл. Всесоюз. симпозиума. - Тбилиси, 1983. - с. 50-51
24. N.G. Kharatishvili, O.G. Zumburidze, Din Chengjun. Vector Quantization Using Different Partition Methods // Special issue on image communication and image processing. Journal of China institute of communications, Beijing, - vol. 14, № 2 1993, pp. 106-108

25. Ding Chengjun, Kharatishvili N.G., Zumburidze O.G. Reduction of specific distortions in image vector quantization. // International Conference on Visual Communications and Image Processing, Boston, USA, - Nov.1992, pp.27-28
26. O.G. Zumburidze, Khoshtaria K.A. Robust quantization of TV signals for DPCM with entrop[y coding // Proc. International Picture Coding Symposium. Sweden 1987, pp.45-46
27. Харатишвили Н.Г., Зумбуридзе О.Г., Дин Чэньцзюнь, Гургунидзе З.А. Методы уменьшения специфических искажений векторного квантования ТВ изображений. // Техника кино и телевидения, - № 10, - 1991, -с. 22-25
28. Зумбуридзе О.Г. Квантование сигналов изображений с учетом свойств получателя // Тр. НИИР. - 1981. - № 1. - 17-19 с.
29. Zumburidze O.G. Design of quantizer for DPCM using visual Thresholds // Picture coding symposium. - Rennes (France), 1984. - p. 3.1.-3.2.
30. Зумбуридзе О.Г. Квантование сигналов изображений с учетом свойств источника сигнала и получателя сообщений // Проблемы цифрового кодирования и преобразования изображений : Тез. докл. и программа Всесоюз. симпозиума. - Тбилиси, 1980. - с.33-34
31. Зумбуридзе О.Г. Оптимальное квантование сигналов изображений // Тез. докл. XXII Республ. науч.-техн. конф. проф.-препод. состава ГПИ им. В.И. Ленина и работников производства. - Тбилиси, 1981. -с. 57-58
32. O.G. Zumburidze, Chengjun Ding, A. Rahmatulla. The Methods of Specific Distortion Minimization in Image Vector Quantization. Proc. of CIS and East European Author ISFOC-93, St. Petersburg Russia. 1993. pp. 30-36
33. Дин Чэньцзюнь, Харатишвили Н.Г., Зумбуридзе О.Г. Трехмерное

векторное квантование последовательности ТВ изображений.

// Труды НИИР, - № 3-4, - 1992, с.21-24.

34. Харатишвили Н.Г., Сюй Шенван, Чхеидзе И.М., Зумбуридзе О.Г., Дюнова В.Г. Сочетание методов построения пирамиды Веивлет и межкадрового предсказания при кодировании ТВ изображений. Труды НИИР, г. Москва, 1993, № 1. с.25-29
35. Зумбуридзе О.Г, Хараташвили Н.Г Рандомизированная процедура квантования сигналов изображения // Электросвязь: Тр.ГПИ им.В.И.Ленина.-1976-№ 7 (189) . - с.12-16.
36. Зумбуридзе О.Г., Нацвлишвили Д.К., Гургенидзе З.А. Вероятностные и информационные характеристики ТВ изображений при векторном квантовании. Труды Груз.технич.университета, №8 (38). Тбилиси 1991, с.54 - 64.
37. Зумбуридзе О.Г. Квантование телевизионных сигналов в микроэлектронном исполнении // Микроэлектроника'84 : Тез.докл. 4-й междунар. конф. по электронным цепям. - Прага, 1984. - с.37-38.
38. Хоштария К.А., Гогоберидзе Л.И., Зумбуридзе О.Г., Буркадзе А.М. Двоичное кодирование телевизионных сигналов // Материалы докл. IV Республ.научн.- техн. конф. - Тбилиси, 1973. - с.27-28.
39. Зумбуридзе О.Г., Харатишвили Н.Г., Мазиашвили Т.И. Некоторые вопросы преобразования шума квантования в цифровых телевизионных системах // Сб. аннот. XVII юбил. научн.-техн. конф. ГПИ им. В.И.Ленина. - Тбилиси, 1972. - с.30-31
40. Зумбуридзе О.Г. Искажения квантования при кодировании телевизионных сигналов// Цифровое кодирование и коммутация сигналов // Цифровое кодирование и коммутация сигналов изображений : Тр. ГПИ им. В.И.Ленина. - 1985. - № 10 (292). - с.34-39.

41. Зумбуридзе О.Г., Кешелава И.Н., Харатишвили Н.Г. Экспериментальное определение закона распределения вероятностей телевизионных сигналов видеотелефонного стандарта // Вопросы цифрового кодирования телевизионных сигналов : Тр. ГПИ им. В.И. Ленина. - 1974. - №8 (172). - с.107 - 111.
42. Зумбуридзе О.Г. Экспериментальное исследование нелинейного преобразования телевизионных сигналов // Вопросы цифрового кодирования телевизионных сигналов: Тр. ГПИ им.В.И.Ленина. - 1974. - №8 (172). - с.5 - 9.
43. А.с. 1095452 СССР, НО4 № 7/13. Система передачи телевизионного сигнала / Н.Г.Харатишвили, Т.А.Векуа, О.Г.Зумбуридзе. - Оpubл.1984, Бюл. №20.
44. А.с. 1104690 СССР, НО" № 7/18. Система передачи и приема телевизионного сигнала с помощью дифференциальной импульсно-кодовой модуляции / Н.Г.Харатишвили, Т.А.Векуа, О.Г.Зумбуридзе. - Оpubл.1984, Бюл. №27.
45. Цифровое телевидение / М.И.Кривошеев, Л.С.Виленчик, И.Н.Красносельский и др.; Под ред. М.И.Кривошеева. - М.: Связь, 1980. - 263 с.
46. Цифровое кодирование телевизионных изображений./ И.И.Цуккерман, Б.М.Кац, Д.С.Лебедев и др.; Под ред. проф. И.И.Цуккермана. - М.: Радио и связь, 1981. - 239 с.
47. Лебедев Д.С., Цуккерман И.И. Телевидение и теория информации. - М.: Энергия, 1965. - 219 с.
48. Красильников Н.Н. Статистическая теория передачи изображений. - М.: Связь, 1976, - 184 с.
49. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. - М.: Радио и связь, 1986. - 247 с.
50. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. -

М.: Сов радио, 1979. - 132 с.

51. Харатишвили Н.Г. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция в системах связи. - М: Радио и связь, 1982. - 135 с.
52. Харатишвили Н.Г. Цифровое кодирование с предсказанием непрерывных сигналов. - М.: Радио и связь, 1986. - 140 с.
53. Pratt W. K Digital image processing.-New York :Wiley Interseince Publication, 1978. -750 p.
54. Методы передачи изображений. Сокращение избыточности / У.К Прэтт, Д.Д.Сакрисон, Х.Г.Д.Мусман и др.; Под ред. У.К.Претта: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1983. - 264 с.
55. Limb J.O.Source-receiver encoding of televsion signals // Proc. IEEE -1967.-55,N3.-pp.364-379.
56. Limb J.O ,Rubinstein C.B. On the design of quantizers for DPCM coders :a functional relationship between visibility ,probability and masking // IEEE trans. -1978.-Vol.com-26,N 5.-pp.573 - 578.
57. O'Neal J.B .Preditive quantizing systems (differential pulse code modulation) for the transmission of telEvision signals // BSTS.-1966.-May -June -pp.689-721.
58. O'Neal J.B .Abound on signal-to-quantizing noise ratio for digital encoding systems // Proc.IEEE.-1967. -Vol.55,N 3. -pp.287-292.
59. Waveform quantization and coding / N.S.JAYAT. Ed.-New York :IEEE press Selected Reprint series. 1976.-212 p.
60. Птачек М. Цифровое телевидение: теория и техника. - М.: Радио и связь, - 1990, - 528 с.
61. Величкин А.И. Теория дискретной передачи непрерывных сообщений. - М.: Сов. радио, 1970. - 296 с.
62. Величкин А.И. Передача аналоговых сообщений по цифровым ка-

налам связи. - М.: Радио и связь, 1983. - 240 с.

63. Трофимова Б.Е., Куликовский О.В. Передача изображений в цифровой форме. - М.: Связь, 1980. - 119 с.
64. Виленчик Л.С. Искажения в цифровом телевидении // Тр. НИИР.- 1977. - №2. - С.36 - 40.
65. Max J. Quantizing for minimum distortion // IRE Trans. Infor.theory.-1960.-Vol.IT-6, N 3.-pp. 7-12.
66. Lloyd S.P. Least Squares Quantization in PCM // IEEE Trans. -1982.-Vol.IT-28,N 2 -pp.129-137.
67. Panter P.F., Dite .W. Quantization distortion in pulse code modulation with non-uniform spacing of levels // Proc.IRE. -1951.-Vol.39.-pp.44-48.
68. Smith B. Instantaneous companding of quantized signals // BSTJ.-Vol. 36,N 3- pp.653-709.
69. Мусман Х.Г. Кодирование изображений с предсказанием // Методы передачи изображений: Пер. с англ. / Под ред. У.К.Претта. - М.: Радио и связь, 1983. - С.68 - 103.
70. Kretz F.,Boudeville J.L ,Sallio P.Opttimization of DPCM Vedio coding scheme using subjectively quality criteria //IERE Conference № 37 LOUGNBOR OUGN (Royaume-Uni).-1977.-September. -pp.184-194.
71. Netravali A.N On quantizers for DPCM coding of picture signals // IEEE Trans.- 1977Vol.IT-23, N 3.-pp.3560-370.
72. Sharma D.K Design of quantizers for DPCM coding of picture signals // IEEE Trans.-1978.-Vol.COM-26,N 11.-pp.1261-1274.
73. Sharma D.K Design of absolutly optimal quantizers for wide class of distortion measures // IEEE Trans. -1978.-Vol.IT-24, N 8.-pp.693-702.
74. Pirch P. Design of DPCM quantizers for video signals using

- subjective tests // IEEE Trans.-1981.-VOL.COM-29,N 7.-pp.990-1000.
75. Schafer R. Design of adaptive and nonadaptive quantizers using subjective criteria // Signal processing.-1983.-Vol.5.-pp.333-345.
76. Schafer R. DPCM coding of chrominance signals for the transmission of color TV signals at 34 Mbit/s // Signal processing .-1984.-Vol.6,pp.187-199.
77. Candy J.C Bosworth R.H. Methods for designinig differential quantizers based on subjective evaluations of edge busyness // BSTJ. - 1972.- Vol.51, n 9.- pp.1495-1516.
78. Linde Y,Buzo A.,Gray R. An Algorithm for Vector Quantizater Design .// IEEE Trans. on Comm.,-V.28- № 1, -1980,-pp.84-95.
80. Ramamurthi B.,Gersho A. Classified vector quantization of images .// -IEEE Trans.on Comm., v.com-34,-№ 11, - NOV. 1986, -pp.1105-1115.
81. Nasrabadi N.,King r. Image Coding Using Vector Quantization Design . // IEEE Tans. on Comm.,V.36,-№ 8,-1988,-pp.957-971.
82. J. Makhoul , S.Roucos , H,Girsh Vector quantization in speech coding .Proc.IEEE ,Vol.73,№ 11 1985,pp.1551-1588.
83. Goldberg M., Sun H. Image Sequence Coding Using Vector Quantization .// IEEE Trans on Comm., -v.34, -№ 7 , -1986, -pp.703-710.
84. J.H.Conway,N.J.A.Sloane,Vorovoi. Reagions of Lattices , Second Moments of polytypes,and quantization. IEEE Trans.on Inform. Theory, Vol.IT-28,№ 2 ,1982,pp.211-226.
85. J.A Buckllew. Companding and random quantization in several dimensions.IEEE Trans.Inf.Theory,Vol.IT-28,1983,pp.239-247.
86. W.H.Equitz Fast algorithms for vector quantization picture

coding .Proc IEEE Inf. Conf. acoust.speech signal processing
Dallas, Apr. 1987. pp. 725-728.

87. Murakami T., Asas K., Yamazaki E. Vector quantizer of video signals. // -Elec. Lett., - v.18, - №23, - 1982, - pp.1005-1006.
88. Gray R.M. Vector quantization. // - IEEE mag., - Apr. 1984, - pp.4-29.
89. Кэтермоул К.В. Принципы импульсно-кодовой модуляции: Пер. с англ. / Под ред. В.В.Маркова. - М.: Связь, 1974. - 408 с.
90. Кассам С.А., Пур Г.В. Робастные методы обработки сигналов. Обзор // ТИИЭР. - 1985. - Т. 73, №3. - С. 54 - 110.
91. Bath W.G., Vande Linde V.D. Robust memoryless quantization for minimum signal distortion // IEEE Trans. - 1982. - Vol. IT-28, №3. - pp.296-306.
92. Bath W.G., Vande Linde V.D. Robust quantizers designed using the companding approximation // IEEE Conf. on Decision and Control. - 1979. - pp.483-487.
93. Kazakos D. New results en robust quantization // IEEE Trans. - 1983. - Vol.COM - 31, №8. - pp.965-974.
94. Poor H.V. Robust quantization of E-contaminated data // IEEE Trans. - 1985. - Vol.COM-33, №3. - pp.218-222.
95. Телевидение /Ю.В.Аксентов, В.Е.Джакония, Жебель Б.Г. и др.; Под ред. П.В.Шмакова. - М.: Связь, 1970. - 540 с.
96. Харатишвили Н.Г., Векуа Т.А. Об одной задаче динамического программирования // Сообщения АН ГССР. - 1983. - №1. - с.137 - 140.
97. Шеннон К. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ. /Под ред. Р.Д.Добрушина и С.Б.Лупанова. - М.: ИЛ, 1963. - с. 243 - 332.
98. A.Gersho. Asymtotically optimal Block Qvantization. IEEE Trans

- on Infor. Theory, vol. IT-25, №4, 1979, pp.373-380.
99. P. Zadoz. Asymptotic quantization of continuous random variables, unpublished memorandum, Bell Laboratories, 1966.
100. S.P.Lloyd. Least squares quantization in PCM, unpublished memorandum, Bell Laboratories, 1957.
101. H.G.Fehn, Noll Multipath search coding of stationary signals with application to speech. IEEE Trans. Comm., Vol.COM-30, №4, 1982, pp.687-701.
102. Dunham M.O., Gray R.M., An Algorithm for the Design of Labelled Transition Finite-State Vector Quantizers.// IEEE Trans. on Comm., vol.COM-33, №1, 1985, pp.83-89.
103. R.L.Baker, R.M.Gray Image compression using non-adaptive spacial vector quantization. Proc. 16th Asilomar Conf. Circuits Syst. Comp. 1982, pp.37-41
104. R.L.Baker, B.M.Gray Differential vector quantization of achromatic imagery. Proc. Int. Picture Coding Symp. 1983, pp.51-53
105. P.Boucher, M.Goldberg. Color image compression by adaptive VQ. Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Processing, 1984, pp.29.61-29.64.
106. P.Westerink, D. Boekee, J. Biemond, J.Woods. Subband Coding of Images Using Vector Quantization. IEEE Trans. on Comm. Vol36, №6, 1988, pp.713-719.
107. T.Lookabangh, R.Gray. High-Resolution Quantization Theory and the Vector Quantization Advantage. IEEE Trans. on Inform. Theory. Vol.35, №5, 1989, pp.1020-1033.
108. T.Chen, A.Lattice Vector Quantization Using a Geometric Decomposition. IEEE Trans. on Comm., Vol.38, №5, 1990, pp.704-714.

109. J.Cassels An Introduction to the Geometry of Numbers.
New-York: Springer-Verlag, 1971
110. J.H.Conway, N.J.A.Sloane. Sphere Packings, Lattices and Groups. New-York: Springer-Verlag, 1988.
111. Olim J. Region-Oriented Predictive Tree-VQ: A New Approach For Image Coding Scheme Based On Segmentation Techniques. // Picture Coding Symposium, Japan, -Sept. 1991, - pp.151-154.
112. J.S.Koh, J.K.Kim Single Block-Effect Reduction Method For Image Coding With Vector Quantization. // Electronics Letters, - v.23, - №14, - 1987, - pp.713-714.
113. Reeve H.C., Lim J.S. Reduction Of Block-Effect In Image Coding. // Opt.Eng., - v.23, -1984, - pp.31-37.
114. Farrelle P.H., Jain A.K. Recursive Block Coding - A New Approach To Transform Coding. // IEEE Comp. Tech., - v.34, - 1986, - pp.161-172.
115. Bei C.D., Gray R.M., An improvement of minimum distortion encoding algorithm for vector quantization.// IEEE Trans. on Comm., vol.COM-33, №10, Oct.1985, pp.1132-1133.
116. Soleymani M.R., Morgera S.D. A fast MMSE encoding technique for vector quantization.// IEEE Trans. on Comm., vol.COM-37, №6, June 1989, pp.656-659.
117. N.Moayeri, D.L.Neuhoff, W.E.Stark. Fine-Coarse Vector Quantization, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.39, №7, 1991, pp.1503-1514.
118. J.Vaisey, A Gersho, Image Compression with Variable Block Size Segmentation, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.40, №8, 1992, pp.2040-2059.
119. T.Berger, Rate Distortion Theory, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, №5, 1971.

120. Finamor W.A., Pearlman W.A., Optimal Encoding of Discrete-Time Continuous-Amplitude Memoryless Sources with Finite Output Alphabets, IEEE Trans. on Inform. Theory, Vol.IT-26, pp.144-155, March 1980.
121. Gallager R.G., Information Theory and Reliable Communication, Wiley, 1968.
122. R.M.Gray, J.C.Kiffer, I.Linde, Information and Control, 45, 1980, pp.178-198.
123. Steinhaus H., Sur la Division des Corps Materiels en Partics, Bull. Acad. Polon. Sc. Vol.4, pp.801-804, 1956.
124. Lloyd S.P. Least Squares Quantization in PCM. IEEE Trans. on Inform. Theory, vol.IT-28, pp.129-136, March, 1982.
125. Fleisher P.E. Sufficient conditions for achieving minimum distortion in quantizer //IEEE Trans. Conversion Record. 1964, Pt.I, pp.104-111.
126. Farvardin N., Modestino J.W. Optimum Quantizer Performance for a Class of Non-Gaussian Memoryless Sources. IEEE Trans. on Inform.Theory, vol. IT-30, pp.485-493, May 1984.
127. Ramamurthi B., Gersho A. Low-Rate Image Coding Using Vector Quantization. IEEE Global Communication Conf. Record, pp.184-187, 1983.
128. MacQueen J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observation. Proc. of the Fifth Berkely Symp. on Math Stat. and Prob., pp.281-296, 1967.
129. Bennett W.R. Spectra of Quantized Signals. Bell System. Tech. Journal, vol.27, pp. 446-472, July 1948.
130. Jamada J., Tazaki S., Gray R.M. Asymptotic Performance of Block Quantizers with Difference Distortion Measures. IEEE trans. on Inform. Theory, vol.IT-26, pp.6-14, Jan. 1980.

131. Gray R.M., Linde J. Vector Quantization and Predictive Quantizers for Gauss-Markov Sources. IEEE Trans. on Comm., vol.COM-30, pp. 381-389, 1982.
132. Gersho A., Cheng D.J. Fast Nearest Neighbor Search for Nonstructured Euclidian Codes. Int. Symp. on Info. Theory Abstracts, pp.88, 1983
133. Dunham M., Foster I., Gray R.M. Finite State Vector Quantization for Wavelform Coding.// IEEE Trans. on Infor. Theory, vol.IT-31, 1985, pp.348-353.
134. J. Hussain, N.Farvardin Variable-Rate Finite-State Vector Quantization and Applications to Speech and Image Coding. IEEE Trans. on Speech and Audio Process. Vol.1, №1, January 1993, pp. 25-38.
135. Закс Ш. Теория статистических выводов : Пер. с англ. / Под ред. Ю.К.Беляева. - М.: Мир, 1975. - 776 с.
136. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. - М.: Энергия, 1974. - 375 с.
137. Миленин Н.К. Оптимальное нелинейное предсказание и корректирование телевизионного сигнала // Вопросы помехоустойчивости и разрешающей способности радиотехнических систем: Тр. рязанского радиотехнич. ин-та. - Рязань, 1973. - Вып. 45. - с. 26 - 39.
138. Лаврентьев М.А., Люстерник Л.А. Курс вариационного исчисления. - М.: Гостехиздат, 1950. - 316 с.
139. Исмаилов Ш.Ю., Малинин Ю.М. Об одном оптимальном законе компандирования в системах передачи информации // Изв. вузов СССР. Сер. Приборостроение. - 1969. - №12. - С. 42 - 46.
140. Кошелёв В.Н. Квантование с минимальной энтропией // Проблемы передачи информации. - 1963. - Вып. 14. - С. 32 - 38.

141. Gibson I.D., Saycod K. Lattice Quantization, chap 3 in Advances in electron Physics, vol.72, P.Hankes, ect., Acedemic Pres 1988, pp.259-330.
142. Шитиков Е.Н. Экспериментальная оценка энергетического спектра и пик-фактоора видеотелефонных сигналов // Сб. научн. тр. ЦНИИС. - 1973. - №1. - С.42 - 46.
143. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. - М.: Сов. радио, 1969. - Т. 1. - 752 с.
144. В.А.Ильин, Э.Г.Позняк. Основы математического анализа, часть 1. - М.: 1971, 599 с.
145. Харатишвили Н.Г., Векуа Т.А. Амплитудные пороги заметности искажений границ цветоразностных сигналов // Тр. НИИР. - 1982.- №1. - С. 92 - 94.
146. Roberts L.G. Picture coding using psendo-random noise // IRE Trans. vol.IT-8, №2, pp.145-154.
147. Limb J.O. Dising of dither waveforms for quantized visual signals// BSTJ, 1969, vol.48, №7, pp.2555-2582.
148. Lippel B.,Kurland M. The effect of Dither on luminance quntization of pictures. //IEEE Trans., vol.COM-19, №6, 1971, pp.879-889.
149. Jolivet J.,Suouls. Codage differential dimages multiniveaux application an visiophone // Annales des Telecom. 1972, №5-6, pp.225-232.
150. Зумбуридзе О.Г., Гогоберидзе Л.И., Андрианова В.Л. Некоторые информационные оценки процесса цифрового кодирования непрерывных сигналов // Тез. докл. XIX науч.-техн. конф. проф.-препод. состава ВТУЗов Закавказских республик. - Тбилиси, 1977. - с. 74-75
151. Denatule F.G.B.,Besoli G.S.,Gionsto D.D.,Lugari M. Adaptive



УДК 621.372.6
621.372.6.01

- image coding via quadtree-based DCT-VQ.// PSC'91, ~~Varen~~,
Sept.1991, pp.49-52.
152. Hubel D.H., Wiesel T. Brain Mechanisms of Vision.// Scientific American, Sep.1979, pp.130-146.
153. Keskes N., Kretz F., Maitze H. Statistical Study of Edges in TV Pictures.// IEEE Trans. on Comm., vol.COM-27, Aug.1979, pp. 1239-1247.
154. Reeve H.C., Lim J.S. Reduction of Block Effect in Image Coding. // ICASSP'83, Boston, 1983, pp.1212-1215.
155. Lee S., Kim D. Image vector quantization based on a classification in the DCT domain// Proc.IEEE, TENCON'87, v.2, 1987, pp.433-437.
156. Марещаль А., Франсон М. Структура оптического изображения: пер. с французского. // Под ред. Г.Г.Смосарева, - М.:Мир, - 1964, - 235 с.
157. Грудзинский М.А., Цуккерман И.И., Шостацкий Н.Н. Дискретизация ТВ изображений при цифровом кодировании. // Техника кино и телевидения, - №11, - 1988, - с. 19-23.
158. Kinoshita K. Image Transmission Carrier and Image Spectrum in Generalized Photographic System.// NHK Technical Monograph, №3, July 1964, pp.234-245.
159. Домбругов Р.М. Телевидение. // Киев: Высшая школа, - 1979, - 176 с.
160. J.W.Woods, S.D.O'Neil Subband Coding of Images.// IEEE Trans. in Acoustics. Speech and Signal Processing, vol.ASSP-34, №5, 1986, pp.1278-1286.
161. S.G.Mallet Multifrequency Channel Decomposition of Image and Wavelet Models, IEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Processing, Vol.37, №12, 1989, pp.2091-2110.

162. J.Miyer Ondelletes at functions splines. presented at the
Seminaire Egnations and Derivees Pastielles, Ecole
Polytechnique, Paris, France, Dec. 1986.
163. G.Strang Wavelet Transforms Versus Fouzicz. Transforms
Bulletin of the American Mathematical Society. Vol.28, №2,
1993, pp.288-305.
164. N.G.Kharatishvili, J.Ronsin*, Shangvang Xu, I.M.Chkeidze,
Diynova V.G. Nonorthogonal Type Pyramid Coding for TV Image
Transformants. International Picture Coding Symposium.
Lausanne, Swetzerland, 1993.
165. A.N.Netravali, J.O.Limb Picture Coding: A review Proc. IEEE,
Vol.68, pp.366-406. Mar. 1980.
166. A.Hobili, Survey of adaptive image coding techiques. IEEE
Trans. Commun., Vol. COM-25, pp.1275-1284, Nov.1977.
167. A.Ansori, M.Rahim Transform Image Coding Using Broad Vector
Quantization. SPIE Vol.1702 Hybrid image and Signal
Processing III, 1992, pp.264-269.
168. C.Labit, J.P.Mmarescq Image coding by vector Quantization in
transform domain / SPIE vol.594. Image Coding, 1985,
pp.106-110.
169. W.H.Chen, C.H.Smith,S.C.fralick A Fast Computational
Algorithm for the Discrete Cosine Transform. IEEE
Treansactions on Common. Vol.COM-25, №9, 1977, pp.1004-1009.
170. J.J.Coblick, J.L.Holsinges Analog source digitization: A
comparision of theory and practice. IEEE Trans. Infor.
Theory, VolIT-13,PP.323-326, April, 1967.
171. A.Gersho Principles of Quantization. IEEE Transactions on
Circuits and and Systems, Vol.CAS-25, №7, June, 1978,
pp.427-436.

172. И.И.Елисеева, В.О.Рукавишников. Группировка, коррекция, распознавание образов. М.: Статистика, 1977, 143 с.
173. Linfuet E.H. An informational measure of correlation - Information and Control. 1957, Vol. 1, pp.85-89.
174. Метод субъективной оценки качества телевизионных изображений. Рекомендация 500-1 XIV пленарная Ассамблея (Киото, 1978).
175. ГОСТ 26320-84. Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений. - М.Издательство стандартов, - 1985, с.1-6
176. CCIT. Transmission of sound broadcasting and Reports of CCIR. - volume XII, 1986.
177. CCITT. Revised texts for Recommendation H. 120 and H. 120 // Annex Z to Q.4#XV of COM XV-R#16. - October, 1986.
178. CCITT. Revised texts for Draft Recommendation H.12 X // Specialists Group on Coding for visual telephones - 1988, April.
179. Харатишвили Н.Г., Купатадзе Т.Г., Зумбуридзе О.Г. и др. Некоторые вопросы построения цифровых устройств видеотелефонии. Аннотации докладов научно-технич. конф. проф.-препод. состава ВТУЗов Закавказских республик. Тбилиси, 1971. с.15-16
180. Зумбуридзе О.Г., Тваури Т.В. К вопросу цифрового кодирования цветных телевизионных сигналов. Тезисы докладов 19-ой научно-тех. конф. проф.препод. состава ВТУЗов Закавказских республик, Тбилиси, 1977, с.40-41
181. Зумбуридзе О.Г., Нанобашвили В.В., Гогоберидзе Л.И. Определение корреляционных функций импульсных процессов на входе узла синхронизации регенератора. Тезисы докладов респ.научно-тех. конф. "Достижения науки - производству". Баку, 1988, с.51-52
182. Zumburidze O.G., Khuntsaria D.M., Kharatisvili N.G. Weighted Hadamard transform image coding with vector quantization Proc.

Int. Pirt. coding Symp., Torino, Italy, July, 1988, pp.37-38

183. Зумбуридзе О.Г., Киладзе К.А. Оценка некоторых информационных и энергетических характеристик квантования с минимальными искажениями цветности.// В кн: Цифровое кодирование и коммутация сигналов изображений. Сб. научн. трудов ГПИ, №10 (352), 1989, с.34-37
184. Чхеидзе И.М. Эффективное кодирование ТВ изображений на основе пирамидальных построений. Диссертационный "Мацне" на соискание ученой степени доктора технических наук, Тбилиси, 1993, 27 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Качественные и информационные характеристики
квантования ТВ изображений

В приложении I использованы следующие обозначения:

- LR2 - LR250 - тестовое изображение "ЛЕНА" после скалярного квантования (цифры после LR - обозначают число уровней квантования);
- LNS10, LNS12, LNS14 - квантования на основе субъективно-оптимизированной шкалы;
- LSDN9, LSDN15 - квантование разностного ТВ сигнала на основе субъективно-оптимизированной шкалы (критерии минимума надпороговой ошибки квантования);
- NDNSK16 - квантование разностного ТВ сигнала на основе субъективно-оптимизированной шкалы (критерии минимума надпороговой ошибки квантования);
- 3296 - CUI - ВКс кодовой книгой $N_1 = 96$ для центральной части и $N_2 = 32$, для периферийной (при шахматной структуре дискретизации);
- LI - ВК с кодовой книгой построенной из центральной части изображения;
- L5 - CUI - ВК с учетом анизотропии пространственного спектра ТВ изображений (с шахматной структурой дискретизации);
- LN5 - ВК с учетом анизотропии пространственного спектра ТВ изображения (с ортогональной структурой дискретизации);
- LENA#1 - ВК с блоками, формы параллелограмма (с наклоном 45°);
- MMSE - MOD - ВК на основе модифицированного алгоритма СКО;
- L - LINI - изображение ошибки (между оригиналом и ВК с интерполяцией);
- L - LOVLIP - изображение ошибки (между оригиналом и ВК с перекрытием и интерполяцией);
- LENINI -9 - ВК с интерполяцией ($N = 512$);
- S - SCLBG - изображение ошибки (для тестового изображения "ШКОЛА" и ВК на основе алгоритма ЛБГ);

- LOVLARIP - ВК с перекрытием и интерполяцией (тестовое изображение "ШКОЛА" при квантовании с кодовой книгой построенной для "ЛЕНА");
- L44 - 320 - ВК с кодовой книгой размером 320;
- LN - 16 - 32 - изображение ошибки (между оригиналом и нормированным ВК);
- LEN8 - NOR - ВК с кодовой книгой $N = 256$ (ВК с нормированием);
- KDI512CL - изображение ошибки (разность между классифицированным ВК при $N = 512$ и исходным тестовым изображением "КРЕМЛЬ");
- L512.CLS - классифицированное ВК ($T = 512$);
- QWLEN1 - ВК в сочетании с Веивлет (квантуются все составляющие)
- L128.DLK - ВК тестового изображения "ЛЕНА" с кодовой книгой тестового изображения "КРЕМЛЬ";
- QWLEN1H - ВК с пирамидой Веивлет (без составляющих ВВ1);
- QWLEN1H2 - ВК с пирамидой Веивлет (без составляющих НН1, НВ1);
- m - математическое ожидание;
- σ - среднеквадратическое значение;
- σ^2 (σ) - дисперсия;
- Γ_1 - ОСШ, Γ_2 - ПОСШ, Γ_3 - СКО в процентах;
- D - коэффициент полной избыточности;
- D_1 - избыточность за счет статистических связей;
- D_2 - избыточность за счет неравномерности распределения;
- $R(Y_1, Y_2)$ - коэффициент корреляции квантованного изображения;
- G_{yx} - информационный коэффициент влияния X на Y , (выраж.4.5.20, 4.5.21);
- $G_{y_1 y_2}$ - информационный коэффициент влияния в квантованном изображении (выраж.4.5.20 и 4.5.21);
- $R(X, Y)$ - информационный коэффициент корреляции (выраж. 4.5.18);
- $R_{y/x}$ - информационная мера связи (выраж. 4.5.17);

- R_c - информационный коэффициент корреляции (выраж.4.5.19);
- $H(Y)$ - безусловная энтропия ;
- $H(Y_1, Y_2)$ - совместная энтропия в одном кадре ТВ изображения;
- $H(Y_1 | Y_2)$ - условная энтропия в одном кадре ТВ изображения;
- $H(X, Y)$ - взаимная энтропия между исходным и квантованным изображениями;
- $H(Y/X), H(X/Y)$ - условие энтропии между исходным и квантованным изображениями;
- K_1 - коэффициент (на основе выраж. 4.5.16);
- K_2 - коэффициент (на основе 4.5.16 с учетом совместной энтропии);
- K_{12} - коэффициент (на основе 4.5.16, с учетом условной энтропии);
- $I(X, Y)$ - количество взаимной информации между исходным и квантованным изображениями;
- $I(Y_1, Y_2)$ - количество информации в одном кадре ТВ изображения;
- $H(X-Y)$ - энтропия разности (между исходным и квантованным изображениями);
- $H(abc(X-Y))$ - энтропия абсолютного значения разности;
- $H(X-Y/y)$ - условная энтропия.

Name	H(y)	H(y1,y2)	H(y1/y2)	H(x,y)	H(y/x)	H(x/y)	K1
Lenna.obr	7.593151	13.019899	5.426748	-	-	0.000000	5.085615
LR2.OBR	0.887816	1.239344	0.351528	7.593151	0.000000	6.705335	08.502505
LR4.OBR	1.786547	2.589648	0.803102	7.593151	0.000000	5.806604	97.868100
LR8.OBR	2.701256	4.062954	1.361698	7.593151	0.000000	4.891895	66.234300
LR9.OBR	2.863332	4.310801	1.447469	7.593151	0.000000	4.729819	64.208352
LR10.OBR	3.010755	4.573713	1.562958	7.593151	0.000000	4.582396	62.365561
LR11.OBR	3.132952	4.808448	1.675496	7.593151	0.000000	4.460198	60.838095
LR12.OBR	3.252191	4.984567	1.732376	7.593151	0.000000	4.347610	59.347610
LR13.OBR	3.357068	5.171435	1.814367	7.593151	0.000000	4.236083	58.036653
LR14.OBR	3.454919	5.335575	1.880655	7.593151	0.000000	4.138231	56.813506
LR15.OBR	3.544479	5.509344	1.964865	7.593151	0.000000	4.048672	55.694010
LR16.OBR	3.632116	5.658956	2.026840	7.593151	0.000000	3.961034	54.598544
LR32.OBR	4.608050	7.460186	2.852136	7.593151	0.000000	2.985101	42.399372
LR64.OBR	5.599886	9.357440	3.757554	7.593151	0.000000	1.993265	30.001427
LR128.OBR	6.596440	11.250677	4.654237	7.593151	0.000000	0.996711	17.544504
LR192.OBR	7.102643	12.163842	5.061199	7.593151	0.000000	0.490508	11.216964
LR250.OBR	7.540129	12.926529	5.386400	7.593151	0.000000	0.053022	5.748393
LNS10.OBR	2.445568	3.763831	1.318263	7.593151	0.000000	5.147583	69.430400
LNS12.OBR	2.745719	4.284492	1.538773	7.593151	0.000000	4.847432	65.678509
LNS14.OBR	2.818856	4.450994	1.632138	7.593151	0.000000	4.774295	64.764301
LSDN9.OBR	5.689079	8.437111	2.748032	9.471841	1.878690	3.782761	28.886510
LSDN15.OBR	6.915434	9.345724	2.430290	10.876925	3.283774	3.961491	13.557075
LDNSK16.OBR	7.601724	10.703127	3.101402	10.857838	3.264688	3.256114	4.978444
3296_CUI.OBR	7.294901	11.288172	3.993271	12.852756	5.259605	5.557855	8.813735
L1.OBR	7.268349	10.461216	3.192867	12.306655	4.713504	5.038306	9.145638
LN5.OBR	7.185461	10.588913	3.403453	12.137833	4.544682	4.952372	10.181738
L5.OBR	7.120552	10.444710	3.324158	12.106362	4.513211	4.985810	10.993102
L5_CUI.OBR	7.325827	11.443927	4.118100	12.566717	4.973567	5.240891	8.427166
LENA#1.OBR	6.776244	9.287561	2.511317	12.023296	4.430145	5.247052	15.296954
LCOSVQ.OBR	7.559536	12.263786	4.704249	12.654015	5.060864	5.094479	5.505794
L44_MM.OBR	7.112992	10.132137	3.019145	12.346504	4.753353	5.233512	11.087604

Name	H(y)	H(y1,y2)	H(y1/y2)	H(x,y)	H(y/x)	H(x/y)	K1
L44QUICK.OBR	7.185662	10.400850	3.215188	12.222520	4.629369	5.036858	10.179229
MAE.OBR	7.529537	12.176519	4.646981	11.949479	4.356329	4.419942	9.880786
MMSE_MOD.OBR	7.526633	12.134968	4.608335	12.058927	4.465776	4.532294	5.917084
LENAROM.OBR	7.121311	10.431313	3.310003	12.111338	4.518187	4.990027	10.983617
LENNA1.OBR	7.586165	12.158964	4.572799	12.146894	4.875796	4.882782	5.172944
LENNA_NO.OBR	7.575356	12.759267	5.183911	12.074784	4.481634	4.499428	5.308045
V44_CUI5.OBR	6.841846	10.937143	4.095297	13.958148	6.364997	7.116301	14.476921
ZON.OBR	7.590398	12.590430	5.000032	11.115400	3.522250	3.525002	5.120021
L-LINT.OBR	4.114268	8.063642	3.949374	11.522971	3.929820	7.408703	48.571648
L-LOVLIP.OBR	4.245011	8.317638	4.072627	11.484147	3.890996	7.239136	46.937366
LENINT_9.OBR	7.588865	12.684442	5.095577	12.268158	4.675007	4.679293	5.139189
LENLBG.OBR	7.188456	10.358621	3.170165	12.213280	4.620129	5.024824	10.144300
LOVLAPIP.OBR	7.262627	10.914454	3.651827	12.136625	4.543474	4.873998	9.217161
S-SCLLBG.OBR	4.151856	8.142594	3.990738	11.634994	4.041843	7.483138	48.101800
SOVLAPIP.OBR	7.376968	10.839578	3.462610	14.340486	6.747336	6.963519	7.787902
L44_320.OBR	7.438672	11.420281	3.981609	12.282804	4.689654	4.844132	7.016596
MT64_8.OBR	7.601086	13.073639	5.472552	11.387853	3.785385	3.777449	4.986423
MULTI-VQ.OBR	7.567662	12.647326	5.079664	12.171373	4.578222	4.603711	5.404228
LN-16-32.OBR	4.218341	8.272585	4.054244	11.446901	3.853750	7.228559	47.270735
LEN8-NOR.OBR	7.571010	12.687095	5.116085	12.217003	4.623852	4.645993	5.362375
KD1512CL.OBR	5.487978	9.817376	4.329398	12.786786	5.193636	7.298809	31.400281
L1024CLS.OBR	7.483178	12.038238	4.555060	11.961287	4.368136	4.478109	6.460280
L128_BLK.OBR	6.946357	10.429593	3.483236	12.335395	4.742244	5.389038	13.170543
L23_64.OBR	6.086546	8.128959	2.042413	11.085010	3.491859	4.998464	23.918173
L512_CLS.OBR	7.395977	11.567374	4.171397	12.240492	4.647341	4.844515	7.550288
QWLEN1.OBR	7.635074	13.068339	5.433264	12.180633	4.587482	4.545558	4.561572
QWLEN1H.OBR	7.632901	12.982123	5.349222	12.231940	4.638789	4.599039	4.588737
QWLEN1H2.OBR	7.630368	12.952695	5.322327	12.277188	4.684037	4.646820	4.620397
ldr16.obr	7.252572	8.686520	1.433948	12.015497	4.422347	4.762925	9.342849

Name	M	Sigma	sqr (Sigma)	Gamma1	Gamma2	Gamma3	D
Lenna.obr	99.001801	52.850031	2793.125821	-	-	-	0.521856
LR2.OBR	102.093750	58.954887	3475.678711	9.676100	16.839096	10.774324	0.956059
LR4.OBR	100.707031	55.959180	3131.429794	15.603944	22.766940	2.751729	0.899612
LR8.OBR	98.321289	54.355603	2954.531539	21.536130	28.699126	0.702081	0.829788
LR9.OBR	98.677734	53.807959	2895.296505	22.739781	29.902778	0.532135	0.819066
LR10.OBR	98.402054	53.733322	2887.269856	23.508791	30.671787	0.445780	0.804630
LR11.OBR	98.603409	53.209708	2831.273059	24.304453	31.467450	0.371154	0.790563
LR12.OBR	98.969269	53.221386	2832.515962	25.275371	32.438367	0.296799	0.783453
LR13.OBR	98.605453	53.136182	2823.453876	25.859574	33.022570	0.259443	0.773204
LR14.OBR	98.757568	53.130951	2822.897922	26.510779	33.673775	0.223317	0.764918
LR15.OBR	98.858017	52.997433	2808.727933	27.092152	34.255148	0.195337	0.754392
LR16.OBR	98.480713	53.010924	2810.158075	27.639201	34.802197	0.172219	0.746645
LR32.OBR	98.512573	52.908398	2799.298548	33.575032	40.738028	0.043903	0.643483
LR64.OBR	98.513367	52.866383	2794.854497	39.229684	46.392680	0.011941	0.530306
LR128.OBR	98.492798	52.851014	2793.229684	43.934602	51.097599	0.004041	0.418220
LR192.OBR	98.765305	52.855161	2793.668047	47.263566	54.426562	0.001878	0.367350
LR250.OBR	98.974884	52.855406	2793.693949	56.701617	63.864613	0.000214	0.326700
LNS10.OBR	91.168396	43.668966	1906.978631	15.622881	22.785877	0.739756	0.835217
LNS12.OBR	92.399841	44.720631	1999.934823	16.278162	23.441158	2.356046	0.807653
LNS14.OBR	90.641846	41.601391	1730.675742	14.286739	21.449735	3.726714	0.795983
LSDN9.OBR	99.324600	51.918193	2695.498715	21.251641	28.414637	0.749611	0.656496
LSDN15.OBR	98.745682	52.946688	2803.351811	28.033223	35.196219	0.157282	0.696214
LDNSK16.OBR	99.391525	52.679556	2775.135603	27.531116	34.694112	0.176558	0.612325
3296_CUI.OBR	98.627472	49.529993	2453.220232	16.014821	23.177817	2.503329	0.500841
L1.OBR	98.656952	51.522225	2654.539636	19.477581	26.640577	1.127826	0.600892
LNS.OBR	98.972107	51.597219	2662.273056	20.093453	27.256449	0.978711	0.574568
L5.OBR	98.685867	51.599542	2662.512756	19.730895	26.893891	1.063924	0.584480
L5_CUI.OBR	98.643951	50.455825	2545.790252	17.733990	24.896986	1.685004	0.485238
LENA#1.OBR	98.861450	50.442331	2544.428741	17.244919	24.407915	1.885854	0.686085
LCOSVQ.OBR	99.008011	50.823897	2583.068524	17.953495	25.116491	1.601956	0.411969
L44_MM.OBR	99.017181	50.650615	2565.484751	18.367591	25.530587	1.456267	0.622607

Name	M	Sigma	sqr (Sigma)	Gamma1	Gamma2	Gamma3	D
L44QUICK.OBR	98.542847	51.681422	2670.969356	16.943366	24.106362	2.021452	0.419127
MAE.OBR	98.893463	52.345210	2740.020968	22.544417	29.707413	0.556619	0.419127
MMSE_MOD.OBR	98.749176	52.087041	2713.059890	22.472796	29.635792	0.565875	0.423958
LENAROM.OBR	98.718689	51.640251	2666.715481	19.721379	26.884375	1.066257	0.586250
LENNA1.OBR	96.950638	52.140137	2718.593923	18.516029	25.679025	1.407334	0.428400
LENN4_NO.OBR	98.508713	51.804826	2683.740006	21.707138	28.870134	0.674973	0.352011
V44_CUI5.OBR	94.915314	35.245635	1242.254761	4.992128	12.155124	31.680146	0.488088
ZON.OBR	99.000626	52.657517	2772.814132	27.959077	35.122073	0.159990	0.374996
L-LINT.OBR	6.146988	9.157021	83.851029	0.370972	7.533968	91.812707	0.506328
L-LOVLIP.OBR	6.788300	8.217702	67.530622	0.422585	7.585581	90.728041	0.490922
LENINT_9.OBR	99.049240	51.807881	2684.056490	20.151164	27.314161	0.965792	0.363053
LENLBG.OBR	98.632080	51.508883	2653.165050	19.525198	26.688194	1.115527	0.603729
LOVLAPIP.OBR	98.566666	51.310302	2632.747112	20.441974	27.604970	0.903239	0.543522
S-SCLLBG.OBR	6.305710	6.413615	41.134462	0.424819	7.587815	90.681368	0.501158
SOVLAPIP.OBR	96.514069	54.140424	2931.185471	3.455662	10.618658	45.126726	0.567174
L44_320.OBR	98.653015	51.866714	2690.156060	20.827988	27.990984	0.826421	0.502299
MT64_8.OBR	98.679703	52.661072	2773.188532	28.112506	35.275502	0.154436	0.315931
MULTI-VQ.OBR	98.993698	52.271612	2732.321417	22.786260	29.949256	0.526470	0.365042
LN-16-32.OBR	6.691025	7.856181	61.719583	0.423981	7.586977	90.698885	0.493220
LEN8-NOR.OBR	98.514893	51.595026	2662.046745	21.155823	28.318819	0.766333	0.360489
KDI512CL.OBR	109.821732	16.311530	266.066014	5.990220	13.153216	25.175495	0.458825
L1024CLS.OBR	98.650728	52.158607	2720.520264	22.645872	29.808868	0.543767	0.430618
L128_BLK.OBR	98.637146	51.253796	2626.951619	13.823765	20.986761	4.145945	0.564595
L23_64.OBR	98.511795	51.722728	2675.240614	20.506073	27.669069	0.890006	0.744698
L512_CLS.OBR	98.594727	51.808537	2684.124541	20.688319	27.851315	0.853430	0.478575
QWLEN1.OBR	99.036270	52.842683	2792.349164	23.206193	30.369189	0.477948	0.320842
QWLEN1H.OBR	99.034012	52.751300	2782.699603	22.624547	29.787543	0.546444	0.331347
QWLEN1H2.OBR	99.032074	52.651289	2772.158243	22.068418	29.231414	0.621095	0.334709
ldr16.obr	99.397995	53.494608	2861.673097	22.112038	29.275034	0.614888	0.820756

Name	D1	D2	R(x,y)	R(y1,y2)	Gyx	Gy1y2	Ry/x	Rc
L44QUICK.OBR	0.552555	0.101792	0.996985	0.999822	0.336658	0.552555	0.355749	0.01345940
MAE.OBR	0.382833	0.058808	0.999123	0.998431	0.417904	0.382833	0.421435	0.01345940
MMSE_MOD.OBR	0.387730	0.059171	0.998902	0.998540	0.403108	0.387730	0.404881	0.01345940
LENAROM.OBR	0.535198	0.109836	0.997255	0.997755	0.342825	0.535198	0.365540	0.353818
LENNA1.OBR	0.397219	0.051729	0.997786	0.998793	0.356949	0.397219	0.357278	0.357113
LENNA_NO.OBR	0.315688	0.053080	0.998972	0.995805	0.407436	0.315688	0.408393	0.407914
V44_CUI5.OBR	0.401434	0.144769	0.784020	0.997940	0.062800	0.401434	0.066966	0.066069
ZON.OBR	0.341269	0.051200	0.999854	0.997184	0.535766	0.341269	0.535960	0.535863
L-LINT.OBR	0.044079	0.485716	0.555430	0.530022	0.024291	0.044079	0.044831	0.031510
L-LOVLIP.OBR	0.040609	0.469374	0.712310	0.540014	0.046623	0.040609	0.083396	0.059809
LENINT_9.OBR	0.328546	0.051392	0.998527	0.996580	0.383748	0.328546	0.383965	0.383856
LENLBG.OBR	0.558992	0.101443	0.997057	0.999838	0.338243	0.558992	0.357285	0.347503
LOVLAPIP.OBR	0.497176	0.092172	0.997824	0.999635	0.358106	0.497176	0.374404	0.366073
S-SCLLBG.OBR	0.038806	0.481018	0.444412	0.524855	0.014488	0.038806	0.026497	0.018734
SOVLAPIP.OBR	0.530619	0.077879	0.846249	0.999801	0.082921	0.530619	0.085351	0.084119
L44_320.OBR	0.464742	0.070166	0.997951	0.999503	0.362039	0.464742	0.369558	0.365760
MT64_8.OBR	0.280030	0.049864	0.999757	0.992893	0.502519	0.280030	0.501994	0.502256
MULTI-VQ.OBR	0.328767	0.054042	0.998733	0.996543	0.393702	0.328767	0.395028	0.394364
LN-16-32.OBR	0.038901	0.472707	0.719512	0.528940	0.048016	0.038901	0.086430	0.061735
LEN8-NOR.OBR	0.324253	0.053624	0.998622	0.996306	0.388134	0.324253	0.389269	0.388700
KDI512CL.OBR	0.211112	0.314003	0.667040	0.949445	0.038764	0.211112	0.053634	0.045003
L1024CLS.OBR	0.391293	0.064603	0.999015	0.998568	0.410244	0.391293	0.416273	0.413236
L128_BLK.OBR	0.498552	0.131705	0.993893	0.999509	0.290276	0.498552	0.317305	0.303189
L23_64.OBR	0.664438	0.239182	0.997208	0.999846	0.341714	0.664438	0.426299	0.379349
L512_CLS.OBR	0.435991	0.075503	0.997949	0.999209	0.361989	0.435991	0.371639	0.366751
QWLEN1.OBR	0.288381	0.045616	0.998873	0.993865	0.401361	0.288381	0.399157	0.400256
QWLEN1H.OBR	0.299189	0.045887	0.998745	0.994794	0.394317	0.299189	0.392264	0.393288
QWLEN1H2.OBR	0.302481	0.046204	0.998619	0.995042	0.388025	0.302481	0.386132	0.387076
ldr16.obr	0.802284	0.093428	0.998258	0.999996	0.372734	0.802284	0.390237	0.381285

Name	D1	D2	R(x,y)	R(y1,y2)	Gyx	Gy1y2	Ry/x	Rc
Lenna.obr	0.285310	0.050856	-	0.993413	1.000000	0.285310	0.116923	0.285310
LR2.OBR	0.604053	0.889023	0.911385	0.811094	0.116923	0.604053	1.000000	0.209367
LR4.OBR	0.550473	0.776682	0.985866	0.927420	0.235284	0.550473	1.000000	0.380939
LR8.OBR	0.495902	0.662343	0.977745	0.965078	0.355749	0.495902	1.000000	0.524801
LR9.OBR	0.494481	0.642084	0.998370	0.970097	0.377094	0.494481	1.000000	0.547666
LR10.OBR	0.480875	0.623656	0.998786	0.971974	0.396509	0.480875	1.000000	0.567858
LR11.OBR	0.465202	0.608381	0.999050	0.972518	0.412602	0.465202	1.000000	0.584173
LR12.OBR	0.467320	0.593476	0.999251	0.975780	0.428306	0.467320	1.000000	0.599740
LR13.OBR	0.459538	0.580367	0.999393	0.976877	0.442118	0.459538	1.000000	0.613151
LR14.OBR	0.455659	0.568135	0.999501	0.978307	0.455005	0.455659	1.000000	0.625434
LR15.OBR	0.445655	0.556940	0.999583	0.978540	0.466800	0.445655	1.000000	0.636487
LR16.OBR	0.441967	0.545985	0.999650	0.979625	0.478341	0.441967	1.000000	0.647132
LR32.OBR	0.381054	0.423994	0.999950	0.984966	0.606869	0.381054	1.000000	0.755344
LR64.OBR	0.328994	0.300014	0.999993	0.987367	0.737492	0.328994	1.000000	0.848915
LR128.OBR	0.294432	0.175445	0.999999	0.989667	0.868736	0.294432	1.000000	0.929758
LR192.OBR	0.287420	0.112170	1.000000	0.991535	0.935401	0.287420	1.000000	0.966623
LR250.OBR	0.285636	0.057484	1.000000	0.993243	0.993017	0.285636	1.000000	0.996496
LNS10.OBR	0.460958	0.694304	0.996236	0.946090	0.322076	0.460958	1.000000	0.487227
LNS12.OBR	0.439574	0.656785	0.997937	0.954219	0.361605	0.439574	1.000000	0.531145
LNS14.OBR	0.420993	0.647643	0.998218	0.952281	0.371237	0.420993	1.000000	0.541463
LSDN9.OBR	0.516964	0.288865	0.999755	0.998805	0.501819	0.516964	0.669773	0.573757
LSDN15.OBR	0.648570	0.135571	0.999650	0.999936	0.478281	0.648570	0.525153	0.500622
LDNSK16.OBR	0.592013	0.049784	0.999915	0.999938	0.571178	0.592013	0.570533	0.570855
3296_CUI.OBR	0.452594	0.088137	0.991430	0.999322	0.268044	0.452594	0.279003	0.273413
L1.OBR	0.550716	0.091456	0.996976	0.999866	0.336467	0.550716	0.351503	0.343821
LN5.OBR	0.526342	0.101817	0.997455	0.999741	0.347784	0.526342	0.367517	0.357378
L5.OBR	0.533160	0.109931	0.997278	0.999748	0.343381	0.533160	0.366171	0.354410
L5_CUI.OBR	0.437865	0.084272	0.995463	0.999182	0.309787	0.437865	0.321091	0.315338
LENA#1.OBR	0.629394	0.152970	0.995406	0.999876	0.308976	0.629394	0.326224	0.326541
LCOSVQ.OBR	0.377707	0.055058	0.996616	0.998343	0.329069	0.377707	0.330532	0.329799
L44_MM.OBR	0.575545	0.110876	0.995529	0.999861	0.310759	0.575545	0.331736	0.320905

Name	K2	K12	I(x,y)	I(y1,y2)	H(x-y)	H(abs(x-y))	H(x-y/y)
L44QUICK.OBR	34.994688	59.810147	2.556293	3.970473	5.378764	4.443836	4.419942
MAE.OBR	23.896759	41.912733	3.173208	2.882556	4.662650	3.841001	4.419942
MMSE_MOD.OBR	24.156451	42.395817	3.060857	2.918299	4.773674	3.925310	4.532294
LENAROM.OBR	34.804291	58.624966	2.603123	3.811308	5.302577	4.366244	4.990027
LENNA1.OBR	24.006477	42.840010	2.710369	3.013365	5.230896	4.344031	4.882782
LENNA_NO.OBR	20.254579	35.201112	3.093723	2.391445	4.771622	3.882919	4.499428
V44_CUI5.OBR	31.642856	48.808792	0.476849	2.746550	7.993249	7.023840	7.116301
ZON.OBR	21.309810	37.499599	4.068149	2.590366	3.708312	3.524592	3.525002
L-LINT.OBR	49.602235	50.632822	0.184448	0.164894	7.683828	7.616470	7.408703
L-LOVLIP.OBR	48.014764	49.092162	0.354015	0.172384	7.593975	7.527035	7.239136
LENINT_9.OBR	20.722238	36.305288	2.913857	2.493288	4.979752	4.114268	4.679293
LENLBG.OBR	35.258621	60.372942	2.568327	4.018291	5.333062	4.396499	5.024824
LOVLAPIP.OBR	31.784664	54.352166	2.719153	3.610800	5.174131	4.245604	4.873998
S-SCLLBG.OBR	49.108787	50.115774	0.110013	0.161118	7.651505	7.622037	7.483138
SOVLAPIP.OBR	32.252636	56.717371	0.629632	3.914358	8.254814	7.268662	6.963519
L44_320.OBR	28.623244	50.229893	2.749019	3.457064	5.110719	4.186802	4.844132
MT64_8.OBR	18.289758	31.593094	3.815702	2.128534	3.925391	3.119529	3.777449
MULTI-VQ.OBR	20.954211	36.504194	2.989440	2.487997	4.830906	3.914788	4.603711
LN-16-32.OBR	48.296344	49.321953	0.364591	0.164097	7.553441	7.496134	7.228559
LENS-NOR.OBR	20.705655	36.048935	2.947158	2.454925	4.938371	4.028888	4.645993
KDI512CL.OBR	38.641401	45.882520	0.294342	1.158579	7.765736	6.806726	7.298809
L1024CLS.OBR	24.761015	43.061751	3.115042	2.928118	4.735704	3.905432	4.478109
L128_BLK.OBR	34.815046	56.459549	2.204113	3.463120	5.921326	4.977661	5.389038
L23_64.OBR	49.194006	74.469839	2.594687	4.044133	5.258350	4.318659	4.998464
L512_CLS.OBR	27.703912	47.857535	2.748636	3.224580	5.120663	4.212310	4.844515
QWLEN1.OBR	18.322884	32.084197	3.047593	2.201810	4.807946	3.892321	4.545558
QWLEN1H.OBR	18.861733	33.134730	2.994112	2.283679	4.870992	3.954184	4.599039
QWLEN1H2.OBR	19.045657	33.470918	2.946331	2.308042	4.928893	4.011373	4.646820
ldr16.obr	45.709248	82.075646	2.830225	5.818624	4.962526	4.012030	4.762925

Name	K2	K12	I(x,y)	I(y1,y2)	H(x-y)	H(abs(x-y))	H(x-y/y)
Lenna.obr	18.625631	32.165647	-	2.166403	-	-	0.44933333
LR2.OBR	92.254101	95.605898	0.887816	0.536287	6.965788	6.007956	0.80333333
LR4.OBR	83.814698	89.961228	1.786547	0.983445	5.976766	5.033234	5.806604
LR8.OBR	74.606538	82.978775	2.701256	1.339558	4.996853	4.062937	4.891895
LR9.OBR	73.057494	81.906635	2.863332	1.415863	4.851709	3.891840	4.729819
LR10.OBR	71.414295	80.463028	3.010755	1.447797	4.697047	3.767004	4.582396
LR11.OBR	69.947200	79.056304	3.132952	1.457457	4.555455	3.608210	4.460198
LR12.OBR	68.846456	78.345302	3.252191	1.519815	4.429536	3.488159	4.340960
LR13.OBR	67.678530	77.320407	3.357068	1.542700	4.319011	3.407709	4.236083
LR14.OBR	66.652659	76.491811	3.454919	1.574264	4.224108	3.292972	4.138231
LR15.OBR	65.566598	75.439185	3.544479	1.579614	4.120446	3.186157	4.048672
LR16.OBR	64.631523	74.664501	3.632116	1.605277	3.998212	3.125233	3.961034
LR32.OBR	53.373836	64.348300	4.608050	1.755914	2.998945	2.252832	2.985101
LR64.OBR	41.515998	53.030570	5.599886	1.842331	1.999280	1.508760	1.993265
LR128.OBR	29.683270	41.822037	6.596440	1.942203	0.999766	0.999766	0.996711
LR192.OBR	23.975988	36.735013	7.102643	2.041444	0.789164	0.789164	0.490508
LR250.OBR	19.209196	32.669999	7.540129	2.153728	0.178684	0.178684	0.053022
LNS10.OBR	76.476058	83.521716	2.445568	1.127305	5.860296	5.102573	5.147583
LNS12.OBR	73.221925	80.765341	2.745719	1.206947	5.592917	4.814717	4.847432
LNS14.OBR	72.181285	79.598269	2.818856	1.186717	5.507427	4.742091	4.774295
LSDN9.OBR	47.268057	65.649603	3.810389	2.941047	3.921428	3.078648	3.782761
LSDN15.OBR	41.589224	69.621373	3.631660	4.485144	4.081966	3.212199	3.961491
LDNSK16.OBR	33.105459	61.232474	4.337037	4.500322	3.380375	2.570833	3.256114
3296_CUI.OBR	29.448927	50.084118	5.035296	3.301631	5.955978	5.005643	5.557855
L1.OBR	34.617402	60.089167	2.554845	4.075482	5.335611	4.398047	5.038306
LNS.OBR	33.819291	57.456843	2.640779	3.782008	5.249793	4.322093	4.952372
L5.OBR	34.720563	58.448024	2.607341	3.796394	5.302935	4.365611	4.985810
L5_CUI.OBR	28.475458	48.52260	2.352260	3.207727	5.597450	4.653939	5.240891
LENA#1.OBR	41.952745	68.608536	2.346099	4.264927	5.628230	4.687035	5.247052
LCOSVQ.OBR	23.351338	41.196882	2.498672	2.855287	5.464976	4.538102	5.094479
L44_MM.OBR	36.674143	62.260681	2.359638	4.093846	5.567211	4.620000	5.233512

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Алгоритм классификации для
классифицированного ВК ТВ изображений

Алгоритм классификации

Алгоритм классификации состоит из двух частей: выделение перепада, после чего с помощью дерева решения происходит вычитание изображения перепада от выделенного перепада. Алгоритм решения аппроксимирует каждый перепад с помощью прямых линий, обнаруживаются вертикальные и горизонтальные перепады. Процесс выделения перепада заключается в следующем.

Допустим, X представляет блок размером $p \times p$ ($k=p^2$) и $x_{i,j}$ является (i,j) -м элементом блока. Определяем два порога T_s и T_e , которые находятся в диапазоне от 0 до 1. Шесть счетчиков S_r , S_v , H_r , H_v , V_r и V_v устанавливаются на 0. Счетчики позволяют определить к какому блоку принадлежит X , к контурному, текстурному или среднеградиентному. Строятся две таблицы модифицированного градиента. Эти таблицы представляют выделенную версию контура блока X . Горизонтальная таблица G_r размера $p \times (p-1)$ содержит информацию о вертикальном перепаде. Вертикальная таблица G_v размера $(p-1) \times p$ содержит информацию о горизонтальном перепаде. Таблицы и счетчики определяются следующим образом:

$$d_r = \frac{2(x_{i,j} - x_{i,j+1})}{x_{i,j} + x_{i,j+1}}, \quad (П2.1)$$

$$d_v = \frac{2(x_{i,j} - x_{i+1,j})}{x_{i,j} + x_{i+1,j}}, \quad (П2.2)$$

которые представляют собой градиенты в горизонтальном и вертикальном направлении. Слагаемое таблицы образуется с помощью

$$G_r(i,j) = \begin{cases} 1, & d_r > T_e & i = 1, 2, \dots, p \\ -1, & d_r < -T_e & j = 1, 2, \dots, p-1 \\ 0, & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (П2.3)$$

$$G_B(i, j) = \begin{cases} 1, & d_B > T_e & i = 1, 2, \dots, p-1 \\ -1, & d_B < -T_e & j = 1, 2, \dots, p \\ 0, & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (\text{П2.4})$$

Счетчики S_r и S_B определяются как

$$S_r \leftarrow S_r + 1, \text{ если } |d_r| > T_s \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad j = 1, 2, \dots, p-1$$

$$S_B \leftarrow S_B + 1, \text{ если } |d_B| > T_s \quad i = 1, 2, \dots, p-1, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

где

H_Π - сумма +1 в G_r и H_O - сумма -1 в G_r . Аналогично,

V_Π - сумма +1 в G_B и V_O - сумма -1 в G_B .

Пороги T_e и T_s являются функциями средней интенсивности пары элементов $(x_{i,j}, x_{i,j+1})$ или $(x_{i,j}, x_{i+1,j}) - d_{cr}$. Пороги вычисляются следующим образом:

$$T_e = \begin{cases} 8,0/d, & \text{если } d < 30 \\ 0,2, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

$$T_s = \begin{cases} 0,1, & \text{если } d_{cr} < 30 \text{ или } d_{cr} > 225 \\ 0,025, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

С учетом того, что интенсивность меняется в диапазоне от 0 до 225. Подходящее значение T_B для большинства перепадов было выбрано равным 0,2. Приведенные выше функции T_s и T_e были найдены эвристическим способом. Когда T_e менялось в пределах от 0,05 до 0,3 доля текстурных блоков увеличивалась. Было найдено, что около значения 0,15 T_e имел перегиб, после чего увеличение происходило медленнее. Исходя из этого порог был выбран равным 0,2. Значение T_s было выбрано равным 0,025, что является средним значением порога Вебера-Фехнера.

Алгоритм решения работает с помощью таблиц (п2.3 и п2.4) и

счетчиков. Определяется еще два порога J_s и J_e . Выбор порогов J_s и J_e определяет, что является случайным изменением интенсивности и что нет. Подходящим значением, для J_s является $(p - 1)$, а для J_e - целая часть от $(p/2)$. Причем, перепад будет считаться положительным, если переход интенсивности происходит от большей к меньшей, по направлению слева направо или сверху вниз. Отрицательный переход определяется как переход интенсивности от меньшей к большей. Решение принимается следующим образом: блок является текстурным, если $S_r < J_s$ и $S_b < J_s$; блок относится к контурному с горизонтальными компонентами положительной полярности, если $V_n \geq J_e$ и отрицательной полярности, если $V_o \geq J_e$; аналогично происходит классификация на контурный блок с вертикальными компонентами положительной и отрицательной полярности с помощью H_n и H_o ; смешанный класс определяется так, если $V_n \geq J_e$ и $V_o \geq J_e$ или $H_n > J_s$ и $H_o > J_s$; если блок не содержит компоненты перепада (контура) и не является текстурным или смешанным, то он классифицируется как среднеградиентный.

Если блок является контурным таблицы п2.3 и п2.4 анализируются для определения местоположения контура. Допустим, что анализируется горизонтальный, а не вертикальный компонент. В этом случае мы проверяем G_b . Процедура заключается в подсчете в каждой строке G_b числа +1 или -1 для положительных или отрицательных полярностей соответственно. Индекс строки, содержащий максимальное число единиц, определяет местоположение перепада. Анализ G_r для вертикального перепада осуществляется аналогично.

Алгоритм работает хорошо для всех классов кроме смешанного класса, который содержит слишком большое число блоков и при их расширении в увеличенном масштабе оказалось, что многие из них принадлежат к контурному классу. Причина заключается в следующем:

- 1 - существуют довольно большая часть блоков, принадлежащих к

диагональным. Этот класс блоков может быть определен путем анализа G_r и G_v одновременно. 2 - блок содержит один преобладающий перепад совместно с другими значительными изменениями градиента, что сбивает правильную работу данного алгоритма. Для этого можно улучшить алгоритм путем дальнейшего анализа смешанного класса и детектирования основных перепадов.

На рис.п2.1 представлена блок-схема дерева решения при классификации на 15 классов. Здесь $J_s = 3$, $J_e = 2$ для $k = 4 \times 4$ ($p = 4$).

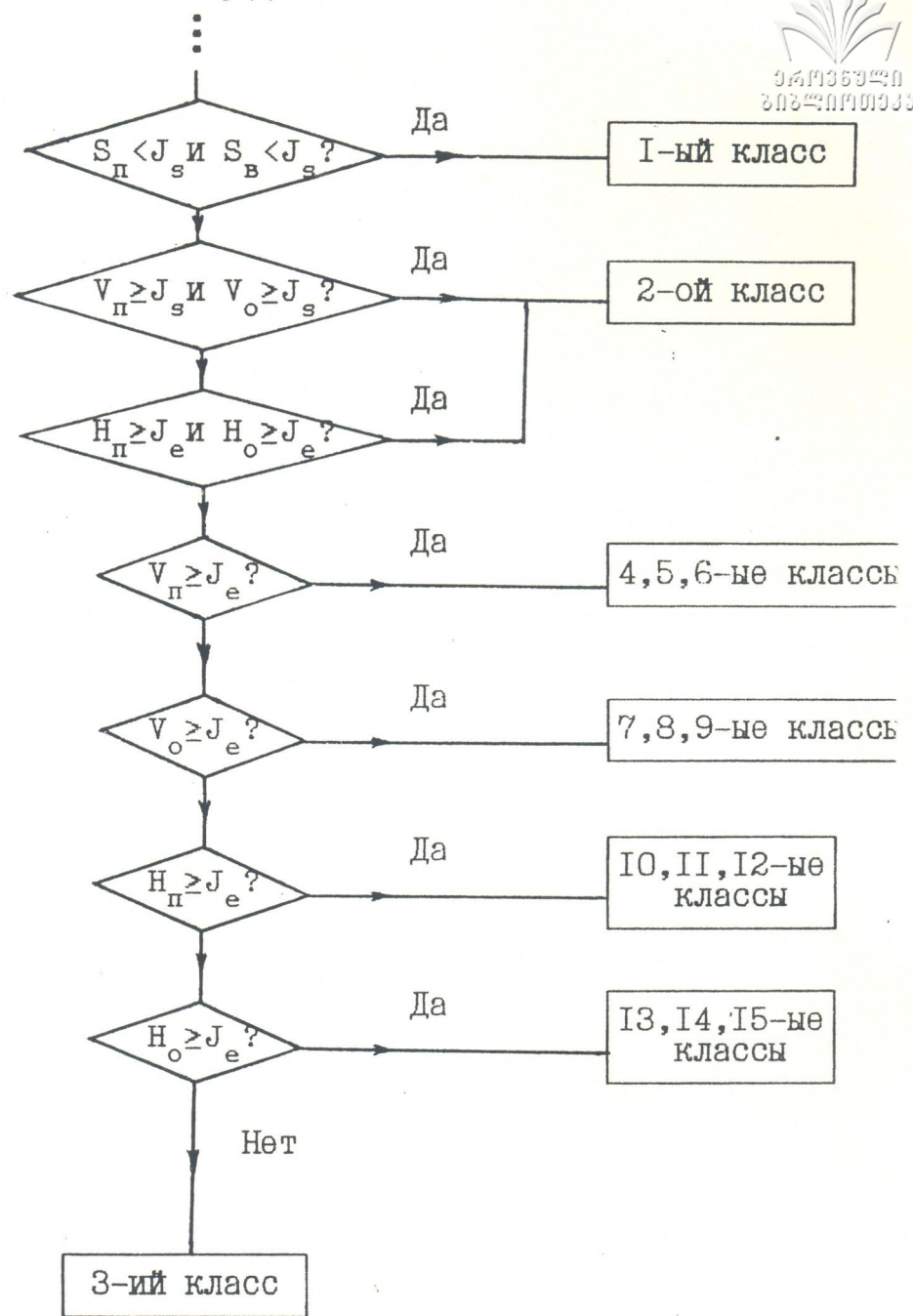


Рис.п2.1 Дерево решения

1022/29

